

ALEXANDRE MOREIRA RAMOS

**APLICAÇÃO, INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA DE REDUÇÕES
BATIMÉTRICAS ATRAVÉS DO METODO GPS DIFERENCIAL PRECISO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Cláudia Pereira Krueger

CURITIBA

2007

R175

Ramos, Alexandre Moreira

Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso / Alexandre Moreira Ramos. - Curitiba, 2007.

xvi, 221 f. : il., tabs, grafs..

Orientadora: Cláudia Pereira Krueger

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Inclui Bibliografia.

1. Levantamentos hidrográficos. 2. Batimetria. 3. Sistema de posicionamento global - RTK (Real Time Kinematic). I. Krueger, Cláudia Pereira. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 526.982

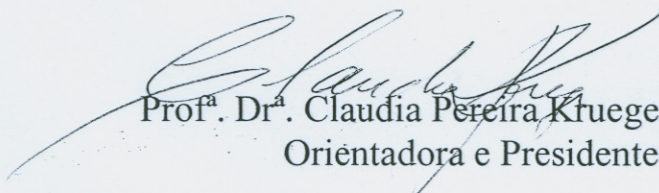
**“APLICAÇÃO, INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DA
METODOLOGIA DE REDUÇÕES BATIMÉTRICAS ATRAVÉS
DO MÉTODO GPS DIFERENCIAL PRECISO”**

POR

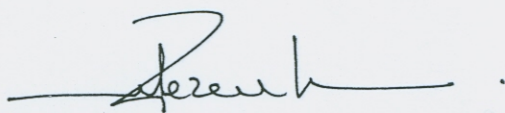
ALEXANDRE MOREIRA RAMOS

Dissertação nº 201 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre
no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 26 de fevereiro de 2007.



Prof.^a. Dr.^a. Claudia Pereira Krueger (UFPR)
Orientadora e Presidente



Cmdt. Dr. José Helvécio Moraes de Rezende - Membro (USP)



Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas – Membro (UFPR)



Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira – Membro (UFPR)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Rosana, pela compreensão, companheirismo, amizade, amor e carinho, que proporcionaram os alicerces seguros para esta realização; e aos meus filhos Daniel e Camila, cujos pequenos sorrisos são as fontes motivadoras da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A realização de um levantamento hidrográfico é um processo que envolve uma complexa logística, demandando elevados custos de material e recursos humanos. Portanto este trabalho é resultado da cooperação de instituições, empresas e pessoas que acreditaram sê-lo possível.

A todas as instituições e empresas que tornaram possível esta pesquisa:

Marinha do Brasil, através da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), pela oportunidade e confiança em mim depositada, ao indicar-me para este Curso de Pós-Graduação.

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que proporcionou o cabedal científico necessário à pesquisa através da alta qualidade de seu corpo docente, além da disponibilização de suas instalações, laboratórios e equipamentos.

Capitania dos Portos do Paraná (CPPR), por todo o apoio administrativo, de pessoal e de material, possibilitando os primeiros experimentos na Ilha do Mel.

Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), pelo suporte técnico e de pessoal que tornou possível a realização dos levantamentos na Baía de Guanabara.

Centro de Sinalização Náutica e Reparos Almirante Moraes Rego (CAMR), pela disponibilização da lancha “SO Oliveira” e sua briosa tripulação.

Base de Hidrografia da Marinha em Niterói (BHMN) pelo empréstimo, montagem e instalação dos equipamentos a bordo da lancha “SO Oliveira”.

Empresas C&C Technologies do Brasil e SightGPS por acreditarem no valor da pesquisa científica, e cederem equipamentos e pessoal de apoio.

A todos as pessoas, que de uma maneira direta ou indireta, colaboraram para a realização deste trabalho:

Professora Dra. Cláudia Pereira Krueger, amiga e orientadora, pelo seu exemplo de profissionalismo e dedicação, orientação segura e objetiva, constante motivação, idéias, e sobretudo, por sua lealdade e sinceridade.

Todos os Professores Doutores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela atenção e gentileza com que sempre me distinguiram.

Professor Geraldo Nogueira, MSc e Comte Roberto Andrade Fernandes, MSc, pelas orientações “hidrográficas”, sugestões de bibliografias e demais colaborações ao longo de todo o trabalho.

Os Senhores membros da banca de qualificação, pelas inúmeras observações que muito contribuíram para o delineamento da pesquisa: Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas, Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira e Cmte. Dr. José Helvécio Moraes de Rezende.

Capitão-de-Fragata Alexandre Borges Briones pelas valiosas sugestões que muito contribuíram para o enriquecimento da pesquisa.

Oficiais e Praças das organizações militares DHN, CHM, BHMN, CPPR e CAMR, pelo incondicional apoio técnico e logístico que tornaram possível a realização do levantamento hidrográfico, e seu subsequente processamento: Capitão-de-Fragata Edson Carlos Furtado Magno, Capitão-de-Corveta Francisco Rogério Ribeiro da Silva, Capitão-de-Corveta Rosuíta Helena Roso, Capitão-de-Corveta Alex Pinto Babinsck, Terceiro Sargento Janio Aguiar da Costa, Terceiro Sargento Wladimir Gomes da Silva, Cabo Graciano Souza Kolokas, e todos aqueles que colaboraram de forma direta ou indireta.

O amigo Capitão-de-Corveta Robson Araújo da Silva, pela amizade e inestimável colaboração, através da Capitania dos Portos do Paraná, e pela cordialidade e disponibilidade em todos os momentos durante os dois anos de curso.

Os colegas do Laboratório de Geodésia Espacial (LAGE), pelo convívio diário sadio, troca de conhecimentos, colaborações no processamento dos dados, esforço e dedicação nos trabalhos de campo: Diuliana Leandro, Jaime Freiburger Junior, Maurício Ihlenfeldt Sejas, Nassau de Nogueira Nardez e Suelen Cristina Movio Huinca.

Todos os companheiros do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pelo espírito de cordialidade e cooperação, que tornaram mais amenos os momentos de dificuldades durante o curso.

Sra. Verali Mônica Kleuser, Secretária do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Meus pais, Altayr e Catarina, todo o meu apreço, estima e respeito, pela possibilidade que me proporcionaram de trilhar o caminho do bem, mostrando que o conhecimento é a chave de todas as portas.

Minha esposa Rosana e meus filhos Daniel e Camila, pela compreensão e paciência diante das minhas ausências em função dos estudos e trabalhos de campo, mas sobremaneira pelo amor que nos renova a cada dia.

Deus, que me concedeu o dom da vida, por mais esta bênção.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 ESTRUTURAÇÃO	5
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	7
2.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS	7
2.1.1 Padrões mínimos de qualidade recomendados pela IHO	7
2.1.2 Datum Altimétrico Hidrográfico	8
2.1.3 Observações do nível do mar	10
2.1.4 Forças Geradoras de Marés	12
2.1.4.1 Análise Harmônica da Maré	20
2.1.4.2 Nível de Redução	21
2.1.5 Integração dos sistemas empregados em Levantamentos Hidrográficos	25
2.2 REDUÇÕES BATIMÉTRICAS	27
2.2.1 Reduções Batimétricas Convencionais (T ₁)	28
2.2.1.1 Transporte de Nível de Redução	30
2.2.1.2 Subáreas de Redução	33
2.2.2 Reduções Batimétricas GPS RTK (T ₂)	36
2.2.3 Análise de qualidade da profundidade reduzida	40
2.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO NAVSTAR-GPS	50
2.3.1 Sinais dos satélites GPS	51
2.3.2 Observações GPS	53
2.3.3 Principais erros associados ao GPS	56
2.3.3.1 Erros associados aos Satélites	56
2.3.3.2 Erros associados à propagação do sinal	57
2.3.3.3 Erros associados ao receptor	59
2.3.3.4 Erros associados à Estação	59
2.3.4 Combinações Lineares das Observações	60
2.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO	62
2.4.1 Técnica <i>Real Time Kinematic</i> (RTK)	66
2.4.1.1 Solução das Ambigüidades	68
2.4.1.2 Mensagens padronizadas RTCM	71
2.4.1.3 Mensagens NMEA 0183	74
2.4.1.4 Latência do Sistema	75
2.4.1.5 Meios de Comunicação	77
2.4.2 Sistemas de Posicionamento DGPS	79
2.4.3 Técnica <i>Real Time</i> GIPSY (RTG)	80
3. LEVANTAMENTOS REALIZADOS	83

3.1 PLANEJAMENTO	84
3.1.1 Área de estudo e planejamento das linhas de sondagem	85
3.1.2 Estações de Referência RTK / DGPS	86
3.1.3 Conexão dos marégrafos ao referencial WGS-84 G1150	88
3.1.4 Determinação dos <i>offsets</i> da embarcação de sondagem.....	91
3.1.5 Aferição dos marégrafos	96
3.1.6 Teste de Latência	98
3.2 EXECUÇÃO	101
3.2.1 Arquivos brutos (*.RAW)	103
3.2.2 Arquivos NMEA DGPS	106
3.2.3 Dados brutos GPS	106
3.2.4 Batimetria	107
3.2.5 Informações de Atitude.....	108
3.2.6 Observações Maregráficas.....	110
3.2.7 Velocidade de propagação do som na água	111
4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	113
4.1 SISTEMA DE REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GPS (SIRBAT/GPS).....	114
4.1.1 Entrada de dados	116
4.1.2 Cálculo das correções de marés GPS (T_2).....	117
4.1.3 Aplicação das correções de marés e análise das linhas de verificação	122
4.1.4 Cálculo da altura da antena GPS e análise da maré GPS (T_2)	125
4.2 CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG (T_2).....	128
4.2.1 Modelo Matemático da Equação Harmônica Simplificada de Maré	129
4.2.2 Média Móvel	131
4.2.3 Aproximação Polinomial	132
4.2.4 Análise das correções de marés GPS.....	132
4.3 APLICAÇÃO E ANÁLISE DAS REDUÇÕES BATIMÉTRICAS	140
4.3.1 Aplicação das correções de marés	141
4.3.2 Cálculo do Erro Total Propagado	142
4.3.3 Análise das Linhas de Verificação.....	148
4.4 ANÁLISE DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO RTK / RTG E DGPS.....	156
4.4.1 Redução das excentricidades entre as antenas a bordo.....	158
4.4.2 Análise de acurácia dos sistemas RTK	161
4.4.3 Análise de acurácia do sistema RTG C-Nav	172
4.4.4 Análise de acurácia dos sistemas DGPS	178
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	184
5.1 CONCLUSÕES	184
5.2 RECOMENDAÇÕES	186
REFERÊNCIAS	187
APÊNDICE 1 - HISTOGRAMAS DAS ANÁLISES DE LINHAS VERIFICAÇÃO ...	196
ANEXO 1 - FICHA F-41-1515-001/05 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA ILHA FISCAL (50140)	203
ANEXO 2 - FICHA F-41-1515-001/85 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO (50141).....	204

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	DATUM ALTIMÉTRICO DOS LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	9
FIGURA 2	VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO NÍVEL MÉDIO DO MAR.....	10
FIGURA 3	FORÇAS ATUANTES SOBRE UM UNIDADE DE MASSA EM UM PONTO (P) SOBRE A SUPERFÍCIE DA TERRA.....	13
FIGURA 4	COMPONENTES HORIZONTAL E VERTICAL DA FORÇA RESULTANTE \vec{F}_M	14
FIGURA 5	COMPONENTES VERTICAIS (a) E HORIZONTAIS (b) DA FORÇA RESULTANTE \vec{F}_M DISTRIBUÍDAS PELA SUPERFÍCIE DA TERRA, PARA DECLINAÇÃO DA LUA IGUAL A ZERO.....	14
FIGURA 6	DISTRIBUIÇÃO SUPERFICIAL DAS FORÇAS DE TRAÇÃO.....	15
FIGURA 7	FORMAÇÃO DAS PREAMARES E BAIXAMARES.....	16
FIGURA 8	ESFERA CELESTE.....	17
FIGURA 9	NÍVEIS DE MARÉ E NÍVEL DE REDUÇÃO DA CARTA NÁUTICA	22
FIGURA 10	ERROS ESTIMADOS NA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE REDUÇÃO.....	25
FIGURA 11	SISTEMA TRIDIMENSIONAL DE COORDENADAS CARTESIANAS DA EMBARCAÇÃO, COM ORIGEM NO CENTRO DE MASSA DA EMBARCAÇÃO.....	26
FIGURA 12	REDUÇÕES BATIMÉTRICAS CONVENCIONAIS.....	29
FIGURA 13	DIAGRAMA DE REDUÇÃO DE PROFUNDIDADES.....	30
FIGURA 14	TRANSPORTE DO NÍVEL DE REDUÇÃO.....	31
FIGURA 15	REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO LINEAR DO NÍVEL DE REDUÇÃO NA ÁREA DE SONDAGEM.....	38
FIGURA 16	SEÇÃO VERTICAL DE UMA LINHA DE SONDAGEM NO SENTIDO OESTE-LESTE EMPREGANDO REDUÇÕES BATIMÉTRICAS COM NR VARIÁVEL.....	39
FIGURA 17	HEAVE INDUZIDO.....	46
FIGURA 18	VARIAÇÃO DE CALADO (<i>SETTLEMENT</i>).....	48
FIGURA 19	VARIAÇÃO DE CALADO (<i>SQUAT</i>).....	48
FIGURA 20	REDE C-NAV GcGPS.....	81
FIGURA 21	RECEPTOR C-NAV 2050M E ANTENA <i>TRI-BAND</i>	82
FIGURA 22	FASES DO LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO.....	83
FIGURA 23	ÁREA DE PESQUISA (BAÍA DE GUANABARA - RJ).....	86
FIGURA 24	SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 G1150 - NR PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA ILHA FISCAL.....	90
FIGURA 25	SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 G1150 - NR PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO.....	90
FIGURA 26	DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA GPS.....	92
FIGURA 27	<i>OFFSETS</i> HORIZONTAIS DA LANCH "SO OLIVEIRA".....	93
FIGURA 28	<i>OFFSETS</i> DAS ANTENAS GPS INSTALADAS NO MASTRO.....	94
FIGURA 29	DIAGRAMAS RESULTANTES DO TESTE DE VAN DE CASTEELE.....	96

FIGURA 30	RESULTADOS DO TESTE DE VAN DE CASTEELE - ILHA FISCAL - 17/07/06.....	97
FIGURA 31	RESULTADOS DO TESTE DE VAN DE CASTEELE - PONTA DA ARMAÇÃO - 17/07/06.....	98
FIGURA 32	LATÊNCIA ENTRE GPS/DGPS - ECOBATÍMETRO.....	99
FIGURA 33	TESTE DE LATÊNCIA ENTRE O RTK TRIMBLE 7400 E ECOBATÍMETRO HYDROTRAC.....	100
FIGURA 34	DISTRIBUIÇÃO DOS COMPUTADORES E EQUIPAMENTOS A BORDO.....	102
FIGURA 35	DIAGRAMA DE CONEXÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	103
FIGURA 36	TRECHO DO ARQUIVO HYPACK DE SONDAGEM 2006SO2090850_21.RAW.....	104
FIGURA 37	SEÇÃO DE ECOGRAMA DO ECOBATÍMETRO HYDROTRAC - DIA 28/07/06.....	107
FIGURA 38	VARIAÇÕES DE ATITUDE (<i>HEAVE, PITCH</i> E <i>ROLL</i>) DURANTE O LEVANTAMENTO DIA 28/07/06.....	109
FIGURA 39	MARÉ PREVISTA X MARÉ OBSERVADA NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO - PERÍODO 26/07/06 A 28/07/06.....	110
FIGURA 40	PONTOS DE COLETA DE PERFIS DE VELOCIDADES DO SOM COM DIGIBAR-PRO.....	111
FIGURA 41	TELA INICIAL DO PROGRAMA SIRBAT/GPS.....	115
FIGURA 42	MENU DADOS.....	116
FIGURA 43	GERAÇÃO DO MAREGRAMA GPS RTK / RTG.....	117
FIGURA 44	SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO RTK / RTG E TAXA DE AMOSTRAGEM.....	117
FIGURA 45	SUBMENU CORREÇÕES DE MARÉS.....	118
FIGURA 46	PROCESSAMENTO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG.....	118
FIGURA 47	FILTRAGEM DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS E ALTURA DA ANTENA GPS RTK.....	119
FIGURA 48	SELEÇÃO DA SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 - NR.....	119
FIGURA 49	BOTÃO PARA CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK.....	120
FIGURA 50	GRÁFICO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS.....	120
FIGURA 51	BOTÕES PARA AJUSTAMENTO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS.....	121
FIGURA 52	PARÂMETROS PARA GERAÇÃO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS.....	121
FIGURA 53	CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ A UMA TAXA DE 60 SEGUNDOS.....	122
FIGURA 54	SUBMENU LINHAS DE VERIFICAÇÃO.....	122
FIGURA 55	PROCESSAMENTO DAS REDUÇÕES BATIMÉTRICAS E ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO.....	123
FIGURA 56	PARÂMETROS PARA ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO.....	124
FIGURA 57	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DA ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO.....	124
FIGURA 58	SUBMENU MARÉ OBSERVADA.....	125

FIGURA 59	SUBMENU MARÉS GPS.....	126
FIGURA 60	CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA GPS.....	126
FIGURA 61	PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA GPS.....	127
FIGURA 62	RESULTADO DO CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA PELO MÉTODO DE GOLDAN.....	127
FIGURA 63	RESULTADO DA ANÁLISE DE ACURÁCIA DAS CORREÇÕES DE MARÉS.....	128
FIGURA 64	VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO DA CURVA DE CORREÇÕES DE MARÉ EM FUNÇÃO DO GRAU DO POLINÔMIO ADOTADO.....	132
FIGURA 65	CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS PELO SIRBAT/GPS.....	134
FIGURA 66	CORREÇÕES DE MARÉS T ₂ FLEXPAK X T ₁ - PONTA DA ARMAÇÃO.....	136
FIGURA 67	CORREÇÕES T ₂ RTK TRIMBLE X CORREÇÕES T ₁ - SONDAÇÃO DIA 28/07/06.....	138
FIGURA 68	CORREÇÕES T ₂ RTK FLEXPAK X CORREÇÕES T ₁ - SONDAÇÃO DIA 28/07/06.....	138
FIGURA 69	CORREÇÕES DE MARÉS T ₂ RTG C-NAV 2050M X T ₁ - PONTA DA ARMAÇÃO.....	139
FIGURA 70	CORREÇÕES DE MARÉS T ₂ RTK TRIMBLE AJUSTADAS POR MÍNIMOS QUADRADOS COM MODELO MATEMÁTICO DA EQUAÇÃO HARMÔNICA DA MARÉ SIMPLIFICADA.....	140
FIGURA 71	PROGRAMA <i>MANUAL TIDES</i> PARA GERAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS.....	141
FIGURA 72	<i>SPIKES</i> DE SONDAÇÃO DA LINHA EW6 (ARQUIVO 2006SO2091219_6.RAW) ASSOCIADAS AO RECEPTOR RTK TRIMBLE 7400 NO DIA 28 DE JULHO.....	142
FIGURA 73	ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PELO PROGRAMA SIRBAT/GPS.....	149
FIGURA 74	HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T ₁) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T ₂) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTK TRIMBLE ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS.....	152
FIGURA 75	HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T ₁) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T ₂) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTG C-NAV ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS.....	152
FIGURA 76	HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T ₁) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T ₂) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTK FLEXPAK ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS.....	153

FIGURA 77	REDUÇÃO DAS EXCENRICIDADES ENTRE AS ANTENAS GPS DURANTE O DESLOCAMENTO NO SENTIDO LESTE-OESTE.....	160
FIGURA 78	PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTK FLEXPAC DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	162
FIGURA 79	PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	163
FIGURA 80	TRECHO DA PLANILHA EXCEL PARA ANÁLISE DO SISTEMA RTK TRIMBLE.....	164
FIGURA 81	TRECHO DA PLANILHA EXCEL PARA CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE EXCENRICIDADE EMPREGADAS NA ANÁLISE DO SISTEMA RTK TRIMBLE.....	165
FIGURA 82	CORREÇÃO DOS EFEITOS SISTEMÁTICOS NAS DIFERENÇAS EM LATITUDE PARA O SISTEMA FLEXPAC, DECORRENTES DO AFASTAMENTO AJUSTADO DE 4,76 m ENTRE AS ANTENAS - 28/07/06.....	167
FIGURA 83	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - <i>OFFSET</i> AJUSTADO 0,288 m.....	168
FIGURA 84	VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIAS TRIMBLE EM INTERVALOS DE UM SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	169
FIGURA 85	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK FLEXPAC DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - <i>OFFSET</i> AJUSTADO 4,76 m.....	170
FIGURA 86	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK FLEXPAC DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 (LATITUDE - MANHÃ) / (LONGITUDE - TARDE).....	171
FIGURA 87	VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIAS FLEXPAC EM INTERVALOS DE UM SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	172
FIGURA 88	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTG C-NAV DURANTE O TESTE ESTATÍCO SOBRE O MARCO PILA - 19/07/06.....	173
FIGURA 89	PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	175
FIGURA 90	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - <i>OFFSET</i> AJUSTADO 0,326 m.....	176
FIGURA 91	VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIAS RTG C-NAV EM INTERVALOS DE 1 SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	177
FIGURA 92	PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO RECEPTOR DGPS TRIMBLE NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	179

FIGURA 93	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DGPS NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	180
FIGURA 94	PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO RECEPTOR DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	181
FIGURA 95	PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	182

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	PADRÕES MÍNIMOS PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	8
TABELA 2	EFEITOS LUNARES SOBRE AS MARÉS.....	18
TABELA 3	ACELERAÇÕES MÁXIMAS DA FORÇA DE MARÉ SOBRE A SUPERFÍCIE DA TERRA DEVIDAS AOS PRINCIPAIS CORPOS CELESTES DO SISTEMA SOLAR.....	19
TABELA 4	COMPONENTES ASTRONÔMICAS ESTÁTICAS.....	21
TABELA 5	CRITÉRIO DE COURTIER PARA CLASSIFICAÇÃO DE MARÉ...	23
TABELA 6	CÁLCULO DE ALTURA DO NR ABAIXO DO NMM PARA MARÉS SEMIDIURNAS COM DESIGUALDADES.....	24
TABELA 7	CONSTANTES PARA CÁLCULO DO ERRO MÁXIMO PERMITIDO.....	42
TABELA 8	PRINCIPAIS COMBINAÇÕES LINEARES DE OBSERVAÇÕES DA FASE DA PORTADORA.....	60
TABELA 9	PRINCIPAIS TIPOS DE MENSAGENS RTCM DAS VERSÕES 2.	72
TABELA 10	GRUPO DE MENSAGENS RTK DO PADRÃO RTCM VERSÃO 3	73
TABELA 11	PRINCIPAIS TIPOS DE MENSAGENS NMEA 0183.....	75
TABELA 12	CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA DGPS DO LITORAL BRASILEIRO.....	79
TABELA 13	ELEMENTOS DE PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO LH.....	84
TABELA 14	DADOS DE RASTREIOS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RTK / DGPS.....	87
TABELA 15	COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RTK / DGPS.....	87
TABELA 16	COORDENADAS DAS RRNN DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS.....	89
TABELA 17	RESULTADO DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DE REFERÊNCIA.....	89
TABELA 18	ALTURAS DAS ANTENAS GPS RTK / RTG.....	95
TABELA 19	OFFSETS DOS RECEPTORES INTEGRADOS AO HYPACK.....	101
TABELA 20	MENSAGENS NMEA HABILITADAS NOS RECEPTORES GPS...	105
TABELA 21	ARQUIVOS DE LINHAS DE SONDAGEM.....	105
TABELA 22	PERÍODOS DAS MENSAGENS NMEA DOS RECEPTORES DGPS - 26/07/06.....	106
TABELA 23	ANÁLISE DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG.....	137
TABELA 24	COMPONENTES HARMÔNICAS PRINCIPAIS (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO).....	146
TABELA 25	ERRO TOTAL PROPAGADO PREVISTO.....	147
TABELA 26	RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO.....	151
TABELA 27	REQUISITOS DE QUALIDADE DA IHO PARA O POSICIONAMENTO HORIZONTAL.....	157
TABELA 28	COMPARAÇÕES REALIZADAS PARA ANÁLISE DE ACURÁCIA	158
TABELA 29	ÍNDICES DE QUALIDADE DAS SOLUÇÕES RTK FLEXPAK.....	163

TABELA 30	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	169
TABELA 31	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTK FLEXPAC DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	172
TABELA 32	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO TESTE ESTATICO DO SISTEMA RTG C-NAV.....	174
TABELA 33	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.....	178
TABELA 34	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO DGPS NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	181
TABELA 35	SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.....	183

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AOC	<i>Auxiliary Output Chips</i>
AR	<i>Antenna Reference</i>
ARP	<i>Antenna Reference Point</i>
AT	<i>Antenna Type</i>
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
BHMN	Base de Hidrografia da Marinha em Niterói
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CAHO	Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais
CAMR	Centro de Sinalização Náutica e Reparo Almirante Moraes Rego
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CTD	<i>Conductivity Temperature Density</i>
DBL	<i>Distance from Beginning of Line</i>
DDF	Dupla Diferença de Fase
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DRP	Diagrama de Redução de Sondagens
ECEF	<i>Earth Centered Earth Fixed</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rate for Global Evolution</i>
ERDGPS	Estação de Referência DGPS
FKP	<i>Flächen Korrektur Parameter</i> (Parâmetros de Correção de Área)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HAT	<i>Highest Astronomical Tide</i>
HADGPS	<i>High Accuracy DGPS</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IERS	<i>International Earth Rotation Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IHO	<i>International Hydrographic Organization</i>
IOC	<i>Intergovernmental Oceanographic Commission</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
Kbps	Kilobits por segundo
LAT	<i>Lower Astronomical Tide</i>
LB	Lancha Balizadora
LH	Levantamento Hidrográfico
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LRK	<i>Long Range Kinematic</i>
LWD	<i>Lower Water Datum</i>
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MHWN	<i>Mean High Water Neaps</i>
MHWS	<i>Mean High Water Springs</i>
MLLW	<i>Mean Lower Low Water</i>
MLWN	<i>Mean Lower Water Neaps</i>
MLWS	<i>Mean Lower Water Springs</i>
MSL	<i>Mean Sea Level</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NMM	Nível Médio do Mar

NMI	Nível do Mar Instantâneo
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
NR	Nível de Redução
NSC	<i>Non Standard Coarse Aquisition</i>
NSCL	<i>Non Standard Civil Long</i>
NSCM	<i>Non Standard Civil Moderate</i>
NSY	<i>Non Standard Y</i>
NTRIP	<i>Network Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OTF	<i>On-the-Fly</i>
PCV	<i>Phase Center Variation</i>
PO	<i>Phase Offset</i>
PRN	<i>Pseudo-Random Noise</i>
RAN	<i>Royal Australian Navy</i>
RF	Rádio Farol
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritme Service</i>
RTG	<i>Real Time GIPSY</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SBES	<i>Single Beam Echosounder</i>
SGR	Sistema Geodésico de Referência
TDF	Tripla Diferença de Fase
TEC	<i>Total Eletron Content</i>
TTFA	<i>Time To Fix Ambiguities</i>
UHF	<i>Ultra High Frequence</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telephone System</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinate</i>
VRS	<i>Virtual Reference Station</i>
XBT	<i>Expendable Bathythermograph</i>
WADGPS	<i>Wide Área DGPS</i>
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

RESUMO

As técnicas GPS diferenciais precisas permitem considerar as variações de suas altitudes elipsoidais como representativas das oscilações do nível do mar. Assim, as correções de marés podem ser determinadas diretamente a partir da variação das altitudes elipsoidais, observadas durante a execução dos levantamentos hidrográficos, dispensando-se as tradicionais medições maregráficas na costa. É necessário determinar a separação vertical entre o NR e o elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, e os vetores de altura da antena GPS e profundidade de imersão do transdutor em relação a um referencial fixo à embarcação de sondagem. A área de pesquisa localiza-se na Baía de Guanabara (Rio de Janeiro / RJ) entre as estações maregráficas da Ponta da Armação e Ilha Fiscal, o que garantiu um bom conhecimento do NR, permitindo considerá-lo constante devido a diferença de 2,3 cm entre os valores de Z_0 das estações maregráficas. Foram empregados os sistemas RTK (*Real Time Kinematic*) Trimble 7400 e FlexPak (NovAtel) e RTG (*Real Time GIPSY*) C-Nav 2050M (C&C Technology, Inc.), além dos receptores geodésicos Ashtech Z-XII e Leica GSX1230. Os sistemas RTK e RTG foram associados, cada um, ao programa de aquisição automática HYPACH versão 4.3a GOLD, para integração das suas soluções de posição ao ecobatímetro monofeixe HYDROTRAC e ao sensor inercial TSS335. Através de nivelamentos geométricos e posicionamento relativo estático foi possível a determinação da separação NR - WGS-84 G1150. As alturas das antenas GPS foram referenciadas à média da linha d'água da embarcação de sondagem durante um determinado período. Estas alturas, combinadas com os valores de separação NR - WGS-84 G1150, proporcionaram acurácias de 2,5 cm (RTK Trimble), 3,3 cm (RTK FlexPak) e 12,8 cm (RTG C-Nav) nas curvas de marés fornecidas pela variação de suas respectivas altitudes elipsoidais. Apesar do sistema RTG C-Nav ter apresentado precisão vertical semelhante aos sistemas RTK (cerca de 15 cm), não foram aplicadas correções dos efeitos de marés terrestres às suas soluções de posição, introduzindo uma diferença de fase e amplitude na tendência da variação de suas altitudes elipsoidais. Como consequência, as profundidades reduzidas obtidas pelas correções de marés RTG C-Nav tiveram uma acurácia estimada de 45 cm. O sistema RTK Trimble forneceu profundidades reduzidas com uma acurácia estimada de 25,5 cm, muito próxima da acurácia de 25 cm obtida pelo método tradicional. Desta forma, o sistema RTG C-Nav, configurado para operações *offshore* (sem correções de marés terrestres), atendeu às especificações para levantamentos de Primeira Ordem, enquanto o sistema RTK Trimble permitiu alcançar os requisitos de qualidade para levantamentos de Ordem Especial. Foi realizada ainda uma verificação da acurácia do posicionamento horizontal dos sistemas RTK, RTG e DGPS, por comparação com coordenadas padrão pós-processadas a partir das observações brutas GPS dos receptores geodésicos instalados a bordo da embarcação de sondagem. Os sistemas RTK obtiveram uma acurácia 2dRMS aproximada de 24 cm, e o sistema RTG C-Nav de 64 cm. Os receptores DGPS apresentaram acurácias 2dRMS de aproximadamente 1 m (Ashtech Z-XII) e de 3 m (Trimble NT200D).

Palavras-chave: Levantamentos Hidrográficos; Batimetria; GPS RTK (*Real Time Kinematic*); Marés

ABSTRACT

The precise differential GPS techniques allow for considering the variations of their ellipsoidal heights as representative of the sea level changes. Therefore, tides corrections can be obtained directly from the variations of ellipsoid elevations, observed during the execution of the hydrographic surveys, without the use of coastal tide gauges. It is necessary to determine the vertical separation among Chart Datum and the reference ellipsoid associated to the WGS-84 G1150 system, also the GPS antenna heights and transducer draft referred to the survey vessel-fixed coordinate system. The research area is located in the Guanabara Bay (Rio de Janeiro / RJ) between Ilha Fiscal and Ponta da Armação Tide Gauges, which guaranteed a best Chart Datum control, allowing for consider it constant due to difference of 2.3 cm among the values of Z_0 tide gauges. It was used the RTK (Real Time Kinematic) systems Trimble 7400 and FlexPak (NovAtel), the commercial WADGPS systems RTG (Real Time GIPSY) C-Nav 2050M (C&C Technology, Inc.), besides the geodetic GPS Ashtech Z-XII and Leica GSX1230. The systems RTK and RTG were associated, each one, to the automatic acquisition software HYPACK version 4.3a GOLD, for integration of their position solutions to the SBES HYDROTRAC and Inercial sensor TSS335. The vertical separation among Chart Datum and the reference ellipsoid associated to the WGS-84 G1150 system was calculated through spirit leveling and GPS relative static positioning. GPS antenna heights were referenced to the survey vessel's medium water line observed during a certain period, which achieved accuracies of 2.5 cm (RTK Trimble), 3.3 cm (RTK FlexPak) and 12.8 (RTG C-Nav) of tidal heights obtained from their ellipsoid elevations changes. Although RTG C-Nav shows vertical precisions similar to the RTK systems (about 15 cm), that difference was attributed the correction for earth tides option not have been activated during all research, introducing a phase and amplitude differences in their trends of the ellipsoid heights. As consequence, the depths charted, obtained by those tides RTG C-Nav corrections achieved an accuracy of 45 cm. The RTK Trimble tides allowed for depths charted with an estimated accuracy of 25.5 cm, very close to the traditional accuracies, about 25 cm. The carrier phase-based WADGPS service C-Nav, configured for offshore operations (no earth tides corrections), assisted to IHO First Order requirements, while the RTK system reach Special Order requirements for hydrographic surveys. It was accomplished an evaluation of horizontal positioning accuracy for the systems RTK, RTG and DGPS, although comparison with pattern coordinates obtained from survey vessel's raw GPS observations post processed. The RTK systems achieved an accuracy of 24 cm 2dRMS, and 64 cm 2dRMS for RTG C-Nav. DGPS equipments achieved accuracies of 1 m (Ashtech Z-XII) and 3 m (Trimble NT200D)

Key-words: Hydrographic Survey; Bathymetry; GPS RTK (*Real Time Kinematic*); Tides

1. INTRODUÇÃO

Atualmente um dos alicerces da economia brasileira tem sido o superávit de sua balança comercial. No ano de 2006 foi escoado 77,46% de todo o volume do comércio exterior nacional (MDIC,2007), através de seus 45 portos principais, distribuídos ao longo de aproximadamente 8.500 km da costa brasileira. Estes dados refletem a significativa importância do desenvolvimento contínuo de uma política marítima que garanta, além da manutenção de seu comércio exterior, o uso adequado e racional de toda a potencialidade do mar territorial e da ZEE (Zona Econômica Exclusiva), que abrange uma área de aproximadamente 4,5 milhões de quilômetros quadrados. A Hidrografia, ramo das ciências aplicadas que trata da medição e descrição das características dos mares e áreas costeiras (IHO,2005,p.2), por meio de levantamentos sistemáticos, produz uma base de dados que provê suporte às atividades de pesquisa, preservação ambiental e de exploração e exploração de recursos marinhos, além de contribuir sobremaneira para a segurança da navegação e para a própria soberania do país.

A Marinha do Brasil é responsável pela elaboração e execução do Plano Cartográfico Náutico Nacional, além do estabelecimento de Normas Técnicas concernentes às Cartas Náuticas de qualquer escala (BRASIL,1967). Tais Normas são elaboradas segundo padrões internacionais de qualidade recomendados pela IHO (*International Hydrographic Organization*), organismo intergovernamental do qual o Brasil foi um dos 19 países membros fundadores, em 1921. Os Levantamentos Hidrográficos realizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) visam, principalmente, à segurança da navegação. Tendo em vista esta finalidade, as profundidades lançadas nas Cartas Náuticas são referenciadas a um plano, denominado Nível de Redução (NR), estabelecido a partir da análise harmônica de séries temporais do nível do mar observadas numa mesma estação maregráfica. Deste modo, durante os trabalhos de campo, é necessária a realização de observações do nível do mar nessa estação, denominada estação maregráfica de referência, localizada preferencialmente na área do levantamento hidrográfico. A alta precisão alcançada atualmente pelo método de posicionamento GPS diferencial aplicando a técnica RTK OTF permite a obtenção de altitudes geométricas compatíveis com os padrões mínimos da IHO sugeridos para as sondagens. Com isso, as variações das altitudes geométricas podem ser consideradas como

resultante do efeito das oscilações do nível do mar, possibilitando eliminar a necessidade de apoio de terra para observações de marés. Além disto, as altitudes do nível do mar observadas pela técnica RTK OTF podem minimizar os erros de determinação do Nível de Redução em regiões mais afastadas da Estação Maregráfica, quando empregados modelos para a interpolação de constantes harmônicas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os primeiros estudos sobre a aplicação de métodos diferenciais de alta precisão foram realizados a partir da segunda metade da década de 80, visando melhorar a acurácia do posicionamento diante dos erros inseridos pela Disponibilidade Seletiva (S/A - *Selective Availability*). A DHN passou a utilizar o posicionamento diferencial, baseado no código C/A, a partir de 1993 (MIGUENS,1996,p.1388), através de sua rede de radiofaróis do sistema DGPS. Em 1999, a técnica RTK foi empregada pela primeira vez em levantamentos hidrográficos na Marinha (DHN,2003,p.24), mas apenas para posicionamento horizontal da embarcação de sondagem. Mais tarde foram adquiridas assinaturas do serviço WADGPS OmniSTAR, que em função do alto custo, ficou restrito a apenas alguns levantamentos em áreas onde não fosse possível utilizar as correções diferenciais baseadas em Radiofarol. Até os dias de hoje o processo de redução das sondagens permaneceu inalterado, dependente das observações realizadas em estação(ões) maregráfica(s) localizada(s), preferencialmente, na área do levantamento.

As primeiras aplicações GPS para observação do nível do mar foram realizadas na década de 90, por intermédio de bóias equipadas com receptores GPS (HEIN et al., 1990). Com o advento dos algoritmos de solução das ambigüidades em curtos intervalos de tempo (On-the-Fly / On-the-Way), o posicionamento diferencial baseado nas correções de fase da onda portadora tornou-se uma realidade. SHANNON e WOODWARD (1998) provaram que as marés obtidas pelo GPS RTK, doravante chamadas de marés RTK (T_2), poderiam substituir as alturas observadas em uma Estação Maregráfica na costa. As altitudes geométricas do nível do mar obtidas pela técnica RTK OTF podem ser consideradas representativas da oscilação de maré na exata área do levantamento. A precisão alcançada pela técnica RTK OTF é da ordem de 10 mm + 1 a 2ppm, para coordenadas planimétricas, e de

15-20 mm + 2ppm, para componentes altimétricas (SEEBER,2003). Já nos métodos tradicionais de redução batimétrica, são empregadas as oscilações de maré observadas na Estação Maregráfica de referência, o que nem sempre é condizente com a verdadeira variação na área de trabalho. Surgem então os erros cotidais¹, obrigando ao estabelecimento de zonas, ou subáreas, de redução. A técnica RTK minimiza os erros cotidais, já que as altitudes geométricas podem representar a variação do nível do mar na própria área do levantamento. Também podem ser eliminadas as correções necessárias às sondagens devidas aos movimentos verticais sofridos pela embarcação de sondagem, por ação do mar e alterações de pressão hidrostática sob o casco durante o seu deslocamento (MARTIN e BROADBENT, 2004).

A metodologia que emprega as altitudes geométricas obtidas pelo GPS RTK para redução batimétrica é descrita no Manual de Hidrografia da IHO (2005), porém somente os Serviços Hidrográficos de alguns países têm utilizado esta técnica, tais como Estados Unidos, Canadá, Austrália e Japão. Sua aplicação no Brasil depende de estudos que fundamentem a elaboração de Normas Técnicas específicas para este tipo de levantamento, assim como de uma boa modelagem da separação entre os níveis de redução locais e o elipsóide de referência. O grande diferencial destes países está no conhecimento do comportamento de seus níveis de redução, através de cartas cotidais confiáveis e constantes harmônicas de marés bem definidas por longos períodos de observação, normalmente acima de 18,6 anos, o que permite uma boa modelagem da onda de maré em função do efeito da regressão dos nodos lunares.

As marés RTK também se coadunam a uma tendência da adoção de um referencial global único para a batimetria, conforme exposto por KUMAR e MAUL (2005). A batimetria representada em uma Carta Náutica está referenciada a um Datum Vertical local, materializado pela combinação de constantes harmônicas definidas através da análise de uma série temporal de observações, coletadas a partir de uma Estação Maregráfica na costa. Este datum local varia espacialmente, não coincidindo com o Datum Altimétrico empregado para os pontos em terra, o que dificulta a integração de dados batimétricos e topográficos, sobretudo no desenvolvimento de aplicações de gerenciamento de zonas costeiras, definição de

¹ Erro devido à correção da diferença entre a maré na área do levantamento e aquela observada na estação maregráfica na costa (ARTILHEIRO, 2005, p.162)

limites marinhos, serviços de previsão de alagamentos, entre outras. Uma possível solução seria o emprego de um datum único. Isto se torna possível com a alta precisão de algumas técnicas espaciais de posicionamento, permitindo a determinação das profundidades em relação a um determinado elipsóide de referência. Entretanto, as características hidrológicas e meteorológicas de cada região devem ser consideradas. Há quatro anos foi criado o Grupo de Trabalho 4.2 “*Vertical Reference Frames*”, dentro da Comissão 4 (*Hydrography*) da FIG (*Fédération Internationale des Géomètres*), que vem desenvolvendo juntamente com a Comissão 5 (*Positioning and Measurements*) pesquisas para o estabelecimento de uma superfície de referência vertical global para Hidrografia (VRSH - *Vertical Reference Surface for Hydrography*), através de modelos de transformação entre os diversos *data* locais e um datum vertical global para Hidrografia (ADAMS, 2005).

Este projeto de pesquisa busca avaliar se as sondagens reduzidas empregando-se os métodos GPS diferenciais precisos, em áreas onde estejam disponíveis séries temporais de observações maregráficas com períodos de pelo menos 32 dias, atendem aos padrões mínimos recomendados pela IHO para Levantamentos de Ordem Especial e de Primeira Ordem (Tabela 1 da seção 2.1.1). São analisadas as acurácias de algumas técnicas do método diferencial como: RTK (*Real Time Kinematic*), RTG (*Real Time GIPSY*) e o DGPS a partir do código ou código suavizado pela portadora.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a aplicação da metodologia de redução batimétrica a partir das altitudes geométricas obtidas pelo método diferencial preciso, verificando a sua adequabilidade aos padrões mínimos sugeridos pela IHO, a fim de propor uma metodologia aplicável aos Levantamentos Hidrográficos executados pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), no país.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Quantificar a contribuição de cada fonte de erro envolvida no processo de redução batimétrica a partir do método diferencial preciso dentro do cálculo do Erro Total Propagado, que deverá ser compatível com o Erro Máximo Permitido recomendado pela IHO, em função do tipo do levantamento;
- b) Analisar a acurácia e o grau de correlação entre a maré observada na Estação Maregráfica de Referência e aquela obtida através das altitudes elipsoidais fornecidas pelos métodos diferenciais precisos;
- c) Analisar a qualidade da sondagem, empregando diferentes métodos para geração das correções de maré;
- d) Desenvolver um programa computacional que permita o processamento das altitudes elipsoidais para geração dos arquivos de correções de marés, a serem aplicados aos dados brutos de profundidade, bem como efetuar a redução de maré considerando linear a variação do nível de redução ao longo da área do levantamento; e
- e) Avaliar a acurácia dos diferentes métodos diferenciais empregados durante os levantamentos hidrográficos realizados.

1.3 ESTRUTURAÇÃO

O capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais que envolvem a aplicação das correções de marés em levantamentos hidrográficos, sendo apresentados os conceitos de levantamentos hidrográficos, sob o enfoque da Cartografia Náutica, envolvendo a caracterização das marés, que define o referencial vertical hidrográfico para a batimetria, denominado nível de redução. Ainda neste capítulo são apresentadas as diferenças entre a metodologia convencional de redução batimétrica através de observações baseadas em marégrafos, e a metodologia proposta, através das variações de altitudes elipsoidais, determinadas por sistemas GPS diferenciais precisos, como o RTK (*Real Time Kinematic*) e o RTG (*Real Time GIPSY*). Em seguida são abordados alguns aspectos do sistema NAVSTAR-GPS e as técnicas RTK, RTG e DGPS, empregadas na pesquisa.

O capítulo 3 descreve os procedimentos de planejamento e preparação para a validação da metodologia proposta, através da realização de um levantamento

batimétrico na Baía de Guanabara (Rio de Janeiro / RJ). As principais demandas para a realização dos levantamentos são abordadas, como definição de estações de referência, análise da qualidade dos marégrafos, determinação do alinhamento entre os sensores hidrográficos empregados e uma análise preliminar da qualidade das marés fornecidas pelas altitudes elipsoidais coletadas a partir da embarcação de sondagem atracada.

O capítulo 4 aborda a execução, processamento e análise dos dados coletados, verificando a aplicabilidade das correções de marés GPS, à luz dos requisitos de qualidade recomendados pela IHO (*International Hydrographic Organization*). São também analisadas as acurácias dos sistemas de posicionamento GPS empregados na pesquisa.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, bem como recomendações para a aplicação da metodologia proposta e sugestões de trabalhos futuros.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

De acordo com a Portaria nº 121/2003 do Comando da Marinha, entende-se por Levantamento Hidrográfico o conjunto de atividades executadas na obtenção de dados batimétricos, geológicos, maregráficos, fluviométricos, topo-geodésicos, oceanográficos e geofísicos, em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, que não tenham como finalidade a pesquisa e a investigação científica, de que trata o Decreto nº 96.000, de 02 de maio de 1988.

O adequado processamento desses dados possibilita um conhecimento preciso da natureza do fundo marinho, sua relação geográfica com a costa, assim como das características e dinâmicas oceânicas das áreas navegáveis. Os Levantamentos Hidrográficos fornecem subsídios, através da coleta sistemática de dados, necessários ao apoio a atividades de preservação ambiental, exploração de recursos naturais, gerenciamento de zonas costeiras, segurança da navegação e o próprio exercício da soberania nacional.

Os Levantamentos Hidrográficos conduzidos pela DHN, por intermédio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) têm como propósito principal garantir a segurança da navegação. Considerando esta finalidade, a carta náutica indica a profundidade mínima que o navegante poderá encontrar naquela região, em condições normais de tempo. Sob essas condições, a profundidade efetiva é obtida somando-se à profundidade da Carta Náutica a altura da maré prevista para um dado instante, extraída das Tábuas de Marés.

2.1.1 Padrões mínimos de qualidade recomendados pela IHO

A DHN adota os padrões estabelecidos pela IHO (tabela 1), que subdivide os levantamentos hidrográficos em quatro tipos, de acordo com a precisão requerida para a segurança da navegação em cada área (ao nível de confiança de 95%).

A navegação oceânica em profundidades superiores a 200 metros, não oferece perigos potenciais ao navegante. No entanto, em canais de acesso e áreas de manobras de portos, onde navios de grande porte navegam com uma folga

mínima sobre a quilha², chegando até a utilizar a lama fluida do fundo para navegação, é imprescindível o máximo de acuracidade nas profundidades representadas na carta náutica. Os dados hidrográficos coletados de acordo com os padrões recomendados são suficientemente precisos, e devem ter suas incertezas quantificadas para serem usados com segurança pelo navegante.

TABELA 1 – PADRÕES MÍNIMOS PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

Ordem	Especial	1	2	3
Exemplos de Áreas Típicas	Portos, atracadouros e canais críticos com pouca profundidade	Portos, canais de aproximação de portos, rotas recomendadas e áreas costeiras com profundidades menores que 100m	Áreas não abrangidas pela Ordem Especial e 1, ou com profundidades menores que 200m	Áreas oceânicas não abrangidas pelas Ordens anteriores.
Acurácia Horizontal	2 m	5 m + 5% da profundidade	20 m + 5% da profundidade	150 m + 5% da profundidade
Perigos à navegação fixos e feições significativas à navegação	2 m	2 m	5 m	5 m
Acurácia para Profundidades Reduzidas	a = 0,25 b = 0,0075	a = 0,5 b = 0,013	a = 1,0 b = 0,023	Mesmo adotado para Ordem 2
Linha de costa natural	10 m	20 m	20 m	20 m
Posição média de auxílios à navegação flutuantes	10 m	10 m	20 m	20 m
Feições topográficas	10 m	20 m	20 m	20 m
Pontos de controle horizontal primário na costa				10 cm
Pontos de controle horizontal secundário na costa				50 cm

FONTE: IHO (1998)

NOTA: Os valores de a e b são constantes relacionadas ao cálculo do Erro Máximo Permitido (EMP) na determinação da profundidade (vide seção 2.2.3)

2.1.2 Datum Altimétrico Hidrográfico

As referências altimétricas de um Levantamento Hidrográfico diferem do Datum Vertical adotado pelo país, nível médio dos mares, determinado pela análise das observações de séries temporais de alturas de marés em uma dada época, em Imbituba (SC).

² Peça disposta em todo o comprimento do casco no plano diametral e na parte mais baixa do navio. Constitui a “espinha dorsal” da embarcação (FONSECA,2002)

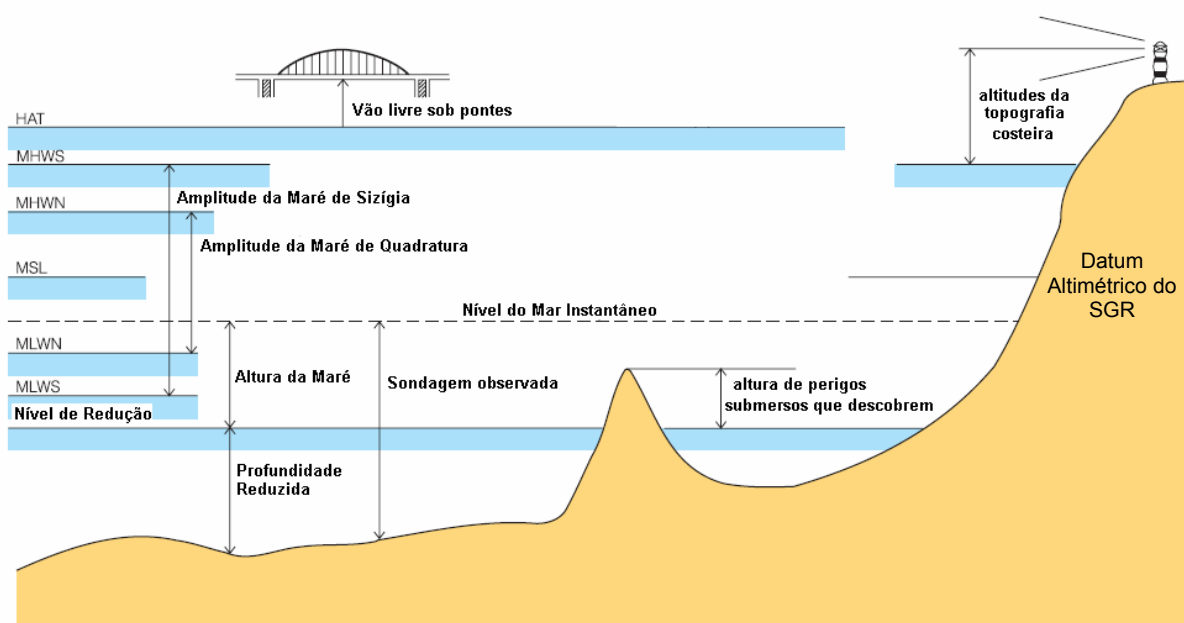


FIGURA 1 - DATUM ALTIMÉTRICO DOS LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

FONTE: Adaptado de IHO (2005)

NOTA: HAT (Highest Astronomical Tide)

MHWS (Mean Higher Water Springs)

MHWN (Mean Higher Water Neaps)

MSL (Mean Sea Level)

MLWN (Mean Lower Water Neaps)

MLWS (Mean Lower Water Springs)

As altitudes dos pontos costeiros são referidas a um Nível Médio do Mar (MSL - *Mean Sea Level*) determinado para a área do levantamento, a partir da análise harmônica de séries temporais de observações de marés tomadas em uma Estação Maregráfica próxima. Algumas vezes pode ser utilizado o Datum HW (High Water) para alturas sob pontes e linhas de transmissão (IHO,2005), conforme representado na FIGURA 1.

As profundidades são referidas a um nível básico, denominado Datum da Carta ou NÍVEL DE REDUÇÃO (NR), o qual é estabelecido a partir da mesma análise empregada para a determinação do MSL. Tanto o NR quanto o MSL são obtidos em função das características locais, que podem gerar alterações sazonais, mensais ou diárias no nível do mar, em virtude de efeitos meteorológicos, hidrológicos ou oceanográficos, movimentos verticais da crosta terrestre (isostáticos ou tectônicos) ou astronômicos, sendo este último o mais significativo. Há regiões no Brasil, como a Baía de São Marcos (MA), onde as amplitudes de marés alcançam cerca de 6 metros, em períodos de sizígia, ou áreas sob influência fluviométrica,

como no rio Amazonas, onde o nível do rio varia aproximadamente 10 metros entre seus períodos de cheia e seca.

2.1.3 Observações do nível do mar

O nível do mar instantâneo é resultado da soma de três principais parcelas: o nível médio do mar para aquela região, a influência maregráfica e fatores meteorológicos. A FIGURA 2 apresenta uma descrição dos principais fatores responsáveis por alterações nos níveis dos mares, e suas respectivas amplitudes.

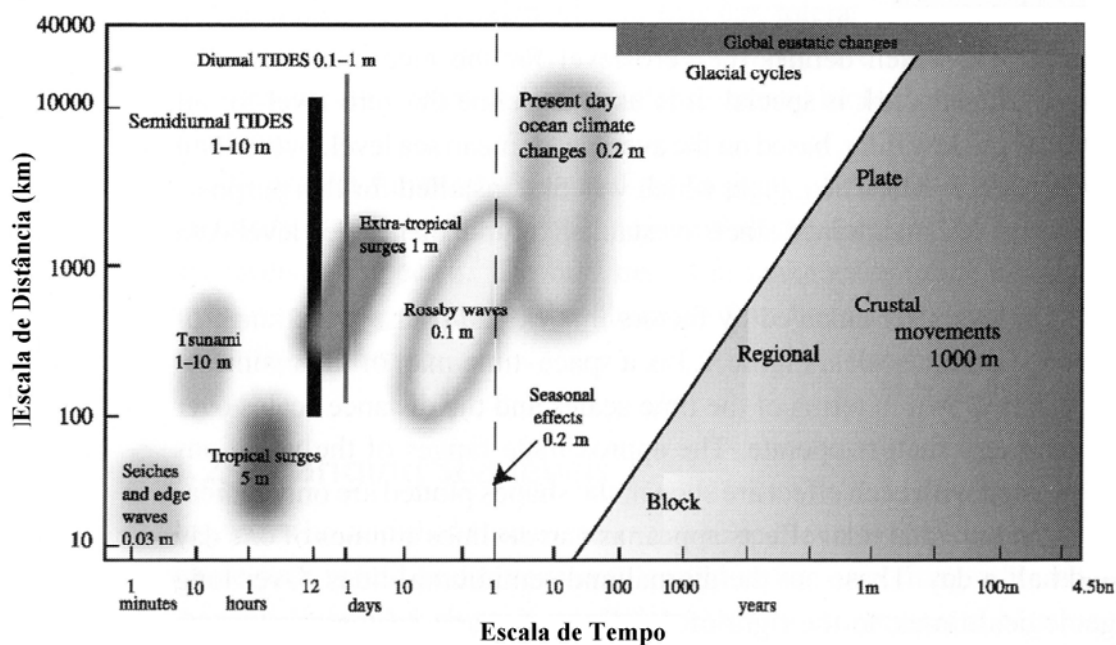


FIGURA 2 - VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO NÍVEL MÉDIO DO MAR
 FONTE: Adaptado de PUGH (2004)

As marés representam uma resposta da massa líquida terrestre às variações gravitacionais provocadas pelos movimentos da Lua e do Sol. Estas respostas provocam variações de ordem periódica nos níveis dos mares, distinguindo-se duas características básicas: amplitude, correspondente a altura entre um nível máximo e mínimo consecutivo, e o período, como tempo decorrido entre estes dois níveis máximos ou mínimos. Associados aos efeitos astronômicos, fatores climáticos como pressão atmosférica, vento e temperatura atuam sobre a superfície dos mares, induzindo alterações irregulares. O nível médio do mar é tomado como uma média aritmética dos níveis observados por séries temporais com duração de pelo menos um ano.

A observação de maré remonta a antigas épocas, quando estudiosos perceberam a relação entre as maiores oscilações do nível do mar e a ocorrência da Lua cheia ou nova, evidenciando que a ação lunisolar era a causa principal do fenômeno. Entretanto, somente após o enunciado da Lei da Gravitação Universal por Isaac Newton (1642-1727), foi possível um estudo qualitativo, em bases matemáticas, das oscilações oceânicas originadas de causas astronômicas, demonstrando a influência da posição relativa do Sol e da Lua nas marés. Newton estabeleceu as bases da Teoria da Maré Estática (FRANCO, 1997, p.14). Mais tarde, Marquis de Laplace (1749-1827) a desenvolveu, introduzindo modificações que permitiam a previsão com razoável precisão. Laplace também iniciou o estudo dinâmico das marés, assim como previu a possibilidade da análise harmônica. Os primeiros desenvolvimentos harmônicos foram realizados por Darwin (1883) e Doodson (1921). Com o surgimento das técnicas computacionais, Cartwright-Edden (1973) apresentou um desenvolvimento harmônico numérico baseado na análise de Fourier da maré estática, gerada ao longo de 18 anos.

Os instrumentos utilizados para registro das alturas do nível do mar instantâneas são os marégrafos. Segundo IOC (2002, p.3) os principais tipos de marégrafos são:

- Acústicos, cujo princípio de funcionamento é a medida do tempo de propagação de um pulso acústico refletido verticalmente a partir da interface entre o ar e a superfície do mar. São obtidas precisões de 0,3 a 2 cm;
- de Pressão, permanecendo submersos, gravando as variações de pressão hidrostática da coluna d'água sobre o sensor, de acordo com as alterações do nível do mar. A precisão depende do tipo de equipamento. Os marégrafos de pressão operados pela Marinha (AAnderaa modelo WLR 7) possuem uma precisão de 0,02% da coluna d'água (AANDERAA, 2006);
- de Flutuador ou limnígrafo (precisão de 1 a 10 cm), operados a partir de um flutuador, que através de uma barra rígida, atua em um registrador;
- Radar, opera de forma semelhante aos marégrafos acústicos, com a diferença de utilizarem pulso radar, tornando-os menos sensíveis a variações climáticas. O marégrafo radar FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) possui uma precisão melhor que 1 cm (MIGUEZ et al, 2005).

2.1.4 Forças Geradoras de Marés

De acordo com a Lei da Gravitação Universal, definida por Newton, a Terra (massa M_T) sofre a ação da força gravitacional (\vec{F}_G) gerada por outros corpos celestes (massa M), a uma distância r entre seus centros de massa, cujo módulo é dado por:

$$F_G = G \frac{M_T \cdot M}{r^2} \quad (2.1)$$

onde G é chamada constante gravitacional universal, definida em unidades do SI como sendo igual a $6,6725985 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$.

Os principais corpos celestes responsáveis pelas forças geradoras de marés são o Sol e a Lua, sendo a maré lunar mais intensa. Como a ação das forças gravitacionais solares e lunares comporta-se de maneira semelhante, são apresentados inicialmente os efeitos gravitacionais da Lua sobre a Terra, e de forma análoga, os efeitos solares. A força gravitacional \vec{F}_G irá variar dependendo da posição relativa do ponto (P), sobre a superfície da Terra.

Além da força gravitacional, o movimento do sistema Terra-Lua em torno do seu baricentro provoca uma força centrípeta (\vec{F}_c) nos dois corpos, cuja intensidade é igual para todos os pontos sobre a superfície da Terra, desconsiderando o movimento de rotação da Terra em torno do próprio eixo, de módulo igual à força gravitacional exercida pela Lua no centro de massa da Terra:

$$F_C = G \frac{M_T \cdot M_L}{r^2} \quad (2.2)$$

onde:

M_L - massa da Lua; e

r - distância entre o centro de massa da Terra e o centro de massa da Lua.

A força resultante (\vec{F}_M), em um ponto (P) sobre a superfície da Terra (FIGURA 3), apresenta um aspecto diferencial, sendo dada por: $\vec{F}_M = \vec{F}_G - \vec{F}_C$.

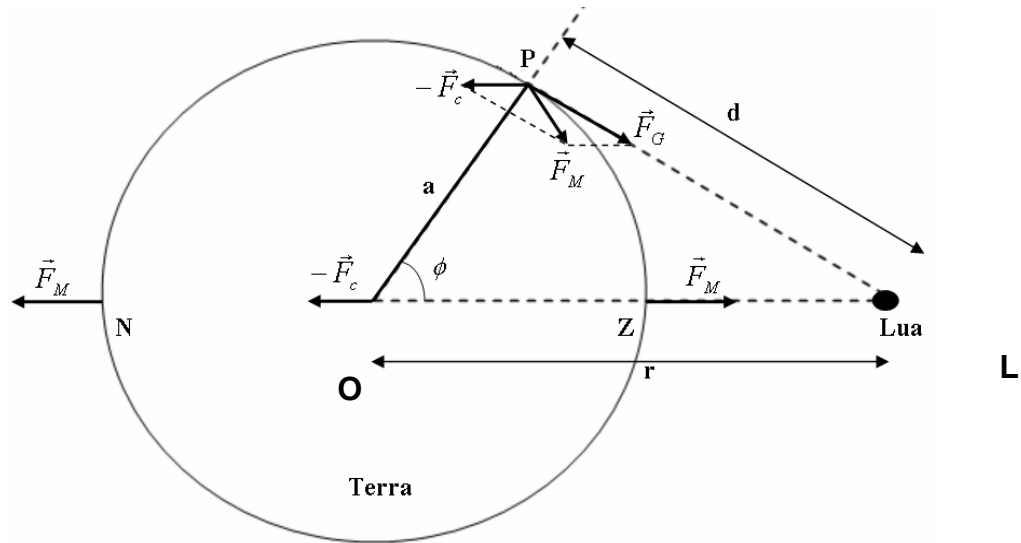


FIGURA 3 - FORÇAS ATUANTES SOBRE UM UNIDADE DE MASSA EM UM PONTO (P) SOBRE A SUPERFÍCIE DA TERRA

Analisando os pontos sublunar (Z) e antípoda (N) da FIGURA 3, a força resultante nestes pontos será dirigida para fora da superfície terrestre, considerando o balanço entre a ação das forças centrípeta e gravitacional. No ponto (Z), a força gravitacional será maior que a força centrípeta, devido a sua maior proximidade com o astro perturbador (Lua), enquanto no ponto (N), a força centrípeta apresenta módulo superior ao valor da força gravitacional.

A força resultante (\vec{F}_M) pode ser representada por suas componentes vertical (F_V) e horizontal (F_H), respectivamente perpendicular e paralela à superfície da Terra, de acordo com a FIGURA 4, através das expressões (LACHAPELLE et al, 2006, p.26):

$$\begin{aligned} F_H &= \frac{3}{2} \cdot G \cdot \frac{M_L \cdot a}{r^3} \cdot \sin(2\phi) \\ F_V &= -\frac{1}{2} \cdot G \cdot \frac{M_L \cdot a}{r^3} \cdot (3 \cdot \cos 2\phi + 1) \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde:

ϕ - distância zenital geocêntrica da Lua;

a - raio da Terra (FIGURA 3); e

r - distância entre os centros de massa da Terra e da Lua (FIGURA 3).

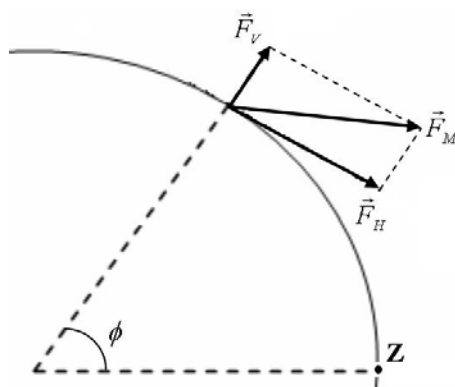


FIGURA 4 - COMPONENTES HORIZONTAL E VERTICAL DA FORÇA RESULTANTE \vec{F}_M

A componente vertical é responsável pela perda de peso de corpos sobre a superfície. É igual a $1/10.000.000$ da força gravitacional terrestre, podendo ser considerada desprezível (FRANCO,1997, p.22), para a produção das marés oceânicas. A componente horizontal tem o efeito de deslocar as massas d' água horizontalmente entre os pontos (N) e (Z), sendo associada à formação das marés.

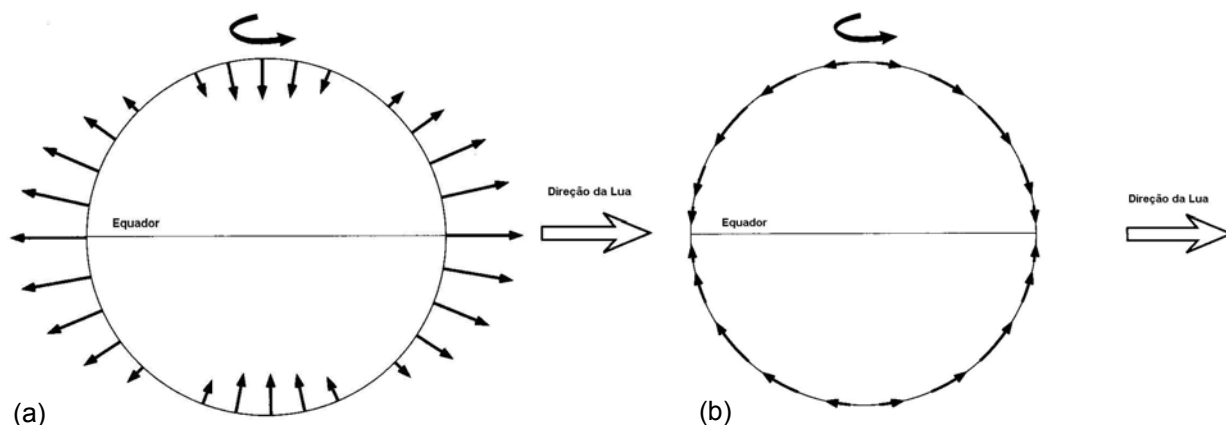


FIGURA 5 - COMPONENTES VERTICAIS (a) E HORIZONTAIS (b) DA FORÇA RESULTANTE \vec{F}_M DISTRIBUÍDAS PELA SUPERFÍCIE DA TERRA, PARA DECLINAÇÃO DA LUA IGUAL A ZERO

FONTE: Adaptado de PUGH (2004)

Analisando as expressões (2.4) percebe-se que a componente horizontal é nula nos pontos sublunar e antípoda, e máximo para $\phi = 45^\circ$ (FIGURA 5a). Já as componentes verticais serão máximas no alinhamento dos pontos sublunar e antípoda, anulando-se nas latitudes defasadas de 35° destes pontos e invertendo sua direção nas latitudes distantes 90° dos pontos (N) e (Z), conforme a FIGURA 5b.

As componentes horizontais foram chamadas por Doodson e Warburg (1941), citados por FRANCO (1997, p.22), de força de tração. A FIGURA 6 apresenta de forma simplificada a distribuição das forças de tração ao longo da superfície terrestre.

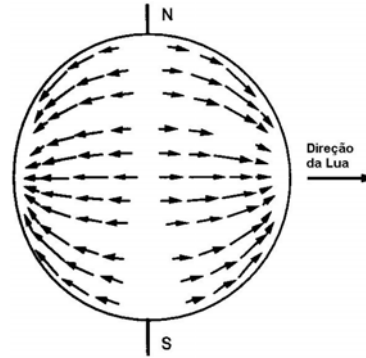


FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO SUPERFICIAL DAS FORÇAS DE TRAÇÃO

A força gravitacional sobre uma partícula de massa unitária é dada pelo gradiente do seu potencial gravitacional. Assumindo que a Lua se comporte como uma massa pontual, o potencial gravitacional da atração lunar (V_P) sobre um ponto P (FIGURA 3) na superfície da Terra é dado por:

$$V_P = G \frac{M_L}{d} \quad (2.4)$$

Aplicando a lei dos cossenos no triângulo OPL da FIGURA 3 tem-se que:

$$d = r \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{a}{r} \cdot \cos \phi + \frac{a^2}{r^2}} \quad (2.5)$$

Substituindo (2.5) em (2.4):

$$V_P = \frac{GM_L}{r} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \frac{a}{r} \cdot \cos \phi + \frac{a^2}{r^2}} \quad (2.6)$$

Expandindo a expressão acima em séries de harmônicos esféricos, através dos polinômios de Legendre (PUGH, 2004, p.234):

$$V_p = \frac{G.M_L}{r} \left\{ 1 + \frac{a}{r} . P_1 . (\cos \phi) + \frac{a^2}{r^2} . P_2 . (\cos^2 \phi) + \frac{a^3}{r^3} . P_3 . (\cos^3 \phi) + \dots \right\} \quad (2.7)$$

onde:

$$P_1 = \cos \phi ;$$

$$P_2 = \frac{1}{2} (3 . \cos^2 \phi - 1) ; \text{ e}$$

$$P_3 = \frac{1}{2} (5 . \cos^3 \phi - 3 . \cos \phi) .$$

Os primeiros termos (graus 0 e 1 dos polinômios de Legendre) produzem apenas uma variação de escala e uma translação (LACHAPELLE et al, 2006, p.33), respectivamente, na superfície da esfera. A partir dos termos de grau 2 são produzidas deformações, correspondendo ao principal termo do potencial gerador de maré:

$$V_p = \frac{1}{2} G.M_L \frac{a^2}{r^3} . (3 . \cos^2 \phi - 1) \quad (2.8)$$

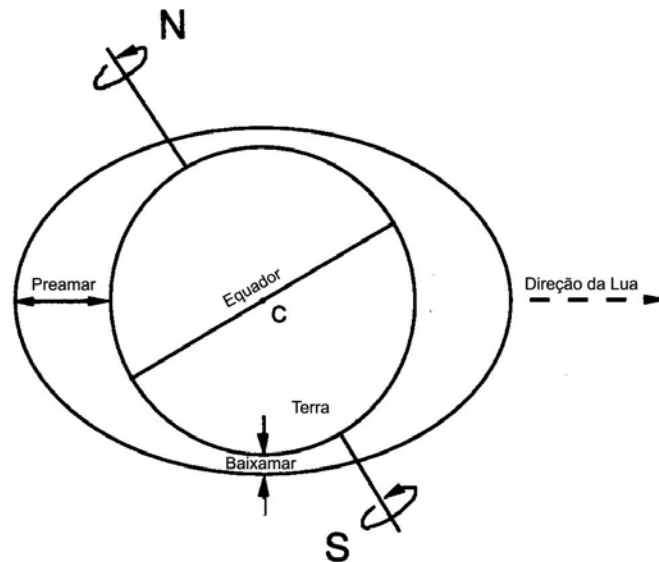


FIGURA 7 - FORMAÇÃO DAS PREAMARES E BAIXAMARES

As deformações da superfície terrestre geradas pelo potencial de atração gravitacional dos termos de grau 2 podem ser representadas por um elipsóide de revolução ao longo na direção da linha que passa pelos centros da Terra e da Lua,

dando origem, quando em equilíbrio, a um bulbo nos pontos sublunar e antípoda, e um achatamento, nos pontos de latitude 90° distantes destes, de tal forma que as forças de tração são compensadas pela força de atração gravitacional terrestre (FIGURA 7).

Para melhor compreensão das forças de tração em função da latitude local (ϕ), declinação (δ) e ângulo horário (t_l) da Lua, tem-se a partir do triângulo esférico PNL, representado na FIGURA 8, a expressão :

$$\cos \phi = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t_l \quad (2.9)$$

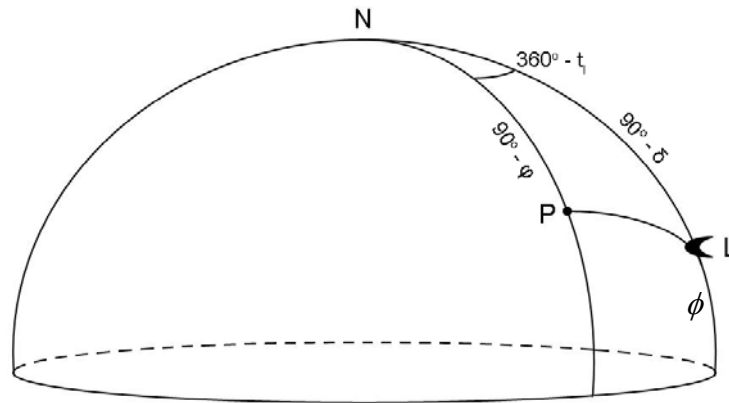


FIGURA 8 - ESFERA CELESTE
FONTE: Adaptado de FRANCO (1997)

Substituindo a expressão (2.9) em (2.8), após efetuar algumas simplificações tem-se o modelo da altura (ζ) da maré estática (LACHAPELLE et al., 2006, p.34):

$$\zeta = \frac{1}{4} G M_L \frac{a^2}{r^3} \cdot \left[\frac{1}{4} (1 - 3 \sin^2 \varphi) \left(\frac{2}{3} - 2 \sin^2 \delta \right) + \sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta \cdot \cos t_l + \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta \cdot \cos 2t_l \right] \quad (2.10)$$

A maré estática é caracterizada por três espécies de ondas lunares principais:

- longo período, proporcionando mudanças de marés mensais ou de maior período de acordo com a distância lunar (r) e a declinação da Lua (δ), representada pelo termo $(1 - 3 \sin^2 \varphi) \left(\frac{2}{3} - 2 \sin^2 \delta \right)$ da expressão (2.10);
- diurna, com uma frequência de aproximadamente um ciclo por dia controlado pela declinação (δ) da Lua e a rotação da Terra, que determina o ângulo horário local da Lua (t_l), representada pelo termo $\sin 2\varphi \cdot \sin 2\delta \cdot \cos t_l$ da expressão (2.10); e

- semidiurna, com dois ciclos por dia, regidos pela rotação da Terra, e pelo dobro do valor do ângulo horário da Lua ($2.t_l$), representada pelo termo $\cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \delta \cdot \cos 2t_l$ da expressão (2.10).

Desconsiderando os efeitos de rotação da Terra, os bulbos formados nos pontos sublunar e antípoda correspondem às preamares nestes pontos, e conseqüentemente as baixamares ocorrem nos pontos de latitude 90° distantes destes primeiros. Entretanto as forças de tração mudam de acordo com as coordenadas dos pontos sublunares e correspondentes antípodas, devido ao movimento de rotação da Terra, às alterações em declinação da Lua e do Sol, variações das distâncias lunares e solares em função das órbitas descritas por estes astros, e outra alteração de longo período devido ao movimento de retrogradação dos nodos lunares.

Com a rotação da Terra, a Lua completa uma volta em torno da Terra em 24h50min. Neste intervalo ocorrem duas preamares e duas baixamares em um ponto da superfície terrestre. Quando a Lua está no plano do Equador (declinação igual a zero), as forças de tração têm a mesma magnitude em dois pontos sobre o mesmo paralelo separados por uma diferença de 180° em longitude. Com a variação da declinação da Lua, estas forças passam a ser diferentes nestes pontos, gerando preamares e baixamares com diferentes amplitudes no mesmo dia.

Os principais efeitos sobre as marés são descritos na tabela 2.

TABELA 2 - EFEITOS LUNARES SOBRE AS MARÉS

Período	Duração (dias)	Causa	Efeito
Nódico	27,2122	Variação de declinação da Lua	Diretamente proporcional à variação das marés diurnas. Inversamente proporcional à variação das marés semidiurnas.
Sinódico	29,5306	Tempo entre duas luas novas	Marés de sizígia e marés de quadratura para áreas de características semidiurnas
Anomalístico	27,5546	Tempo entre duas passagens pelo perigeu	Aumento das forças de marés lunares.
Nodal	18,61 anos	Variação da inclinação da órbita lunar em relação à eclíptica $\pm 5^{\circ}09'$	Diretamente proporcional à variação das marés diurnas. Inversamente proporcional à variação das marés semidiurnas.

FONTE: Adaptado de PUGH (2004)

As forças geradoras de maré devidas ao Sol podem ser calculadas da mesma forma que as forças devidas à Lua, resultando em um valor 46% mais fraco que as forças de maré lunares, de acordo com a relação entre as expressões (2.8),

empregando os parâmetros de massa da Lua e do Sol (M_L e M_S) e respectivas distâncias entre seus centros de massa e a Terra (r_L e r_S).

$$\frac{V_{P,S}}{V_{P,L}} = \frac{M_S \cdot r_L^3}{M_L \cdot r_S^3} = \frac{1,99 \cdot 10^{30} \cdot (0,38 \cdot 10^9)^3}{7,35 \cdot 10^{22} \cdot (1,49 \cdot 10^{11})^3} \cong 0,46$$

Muito embora o Sol possua massa da ordem de 10^8 vezes a massa da Lua, os efeitos gravitacionais da Lua sobre a Terra são maiores devido a sua maior proximidade. Assim, as marés de sizígia são 1,46 vezes maiores que a maré de equilíbrio lunar, e as marés de quadratura são 0,54 vezes menores. A Tabela 3 apresenta a influência dos demais astros do Sistema Solar sob a forma de contribuição extrema à força resultante \vec{F}_M .

TABELA 3 - ACELERAÇÕES MÁXIMAS DA FORÇA DE MARÉ SOBRE A SUPERFÍCIE DA TERRA DEVIDAS AOS PRINCIPAIS CORPOS CELESTES DO SISTEMA SOLAR

CORPO CELESTE	ACELERAÇÃO (m/s^2)
Lua	$1,37 \cdot 10^{-06}$
Sol	$0,50 \cdot 10^{-06}$
Mercúrio	$3,64 \cdot 10^{-13}$
Vênus	$5,88 \cdot 10^{-11}$
Marte	$1,18 \cdot 10^{-12}$
Júpiter	$6,54 \cdot 10^{-12}$
Saturno	$2,36 \cdot 10^{-13}$
Urano	$3,67 \cdot 10^{-15}$
Netuno	$1,06 \cdot 10^{-15}$

FONTE: HECK³ (2007)

Todos os efeitos lunares descritos na Tabela 2 são válidos para o Sol. No Brasil, com marés predominantemente semidiurnas, observam-se as maiores amplitudes nos meses de março e setembro, nos equinócios de outono e primavera, quando a declinação do sol é zero, que em combinação com os períodos de sizígia dão origem às maiores marés do ano, denominadas marés equinociais de sizígia.

³ HECK, B. *Geodetic Reference Frames and Systems*, fevereiro, 2007. Curso proferido na Universidade Federal do Paraná.

2.1.4.1 Análise Harmônica da Maré

É um método matemático baseado na análise de Fourier, para processamento de dados amostrados a partir de um maregrama para determinação das constantes harmônicas (amplitude e fase) das diversas componentes da onda de maré (FRANCO, 1997). O período de observações necessário para a distinção das várias componentes poderá ser estabelecido de acordo com o critério de RAYLEIGH, que considera apenas as componentes separadas de pelo menos um ciclo completo. Este tempo mínimo de observação para separação de um par de componentes harmônicas dá-se o nome de período sinódico (PUGH, 2004), e dependerá das freqüências angulares das componentes a serem determinadas, sendo dado por:

$$t = \frac{360}{\Delta w_n} \quad (2.11)$$

onde Δw_n corresponde à diferença das velocidades angulares das componentes.

A partir da definição das componentes harmônicas de um determinado lugar, torna-se possível fazer a previsão da altura da maré astronômica (ζ) em um dado instante t , a partir da combinação de Q componentes harmônicas de amplitudes H_j :

$$\zeta(t) = Z_0 + \sum_{j=1}^Q f_j \cdot H_j \cdot \cos[\omega_j \cdot t + V_j + u_j - G_j] \quad (2.12)$$

onde:

Z_0 - nível médio do mar acima de um datum arbitrário local.

V_j - fase astronômica estática referida a Greenwich.

G_j - atraso de fase em hora legal, obtido a partir da análise harmônica. O atraso de fase corresponde a uma diferença entre a fase da maré estática e a real.

ω_j - freqüência da componente (ω° / h).

f_j e u_j - correções nodais⁴, respectivamente chamados de fator e ângulo perinodal (FRANCO, 1997, p.96).

As principais componentes harmônicas empregadas para o cálculo do nível de redução são descritas na tabela 4.

TABELA 4 - COMPONENTES ASTRONÔMICAS ESTÁTICAS

Componente	Descrição	Frequência (ω° / h)
M_2	Semidiurna lunar principal	28,9841042
S_2	Semidiurna solar principal	30,0000000
N_2	Semidiurna lunar elíptica maior	28,4397295
K_2	Semidiurna lunissolar declinacional	30,0821373
K_1	Diurna lunissolar declinacional	15,0410686
O_1	Diurna lunar principal	13,9430356
P_1	Diurna solar principal	14,9589314

FONTE: FRANCO (1997, p.89)

Análises individuais da variação de amplitudes de algumas componentes harmônicas, durante o período completo de retrogradação dos nodos da órbita lunar de 18,61 anos, apresentaram alterações em torno do valor médio de 3,7% para a componente M_2 , e de até 28,6% para K_2 (PUGH, 2004).

2.1.4.2 Nível de Redução

A Estação Maregráfica materializa um datum vertical local para referência de profundidade e demais perigos submersos representados em uma carta náutica. Este datum é denominado Nível de Redução (NR), que deverá estar em um plano suficientemente abaixo do nível médio do mar, de modo que represente as profundidades mínimas a serem encontradas na região. Existem vários planos para definição do NR. Nos Estados Unidos o NR adotado é o plano definido pelo MLLW (*Mean Lower Low Water*), definido pela média dos mais baixos níveis de maré preditos para um período de 19 anos. Em áreas cujas variações de maré sejam pequenas (amplitudes centimétricas), como no caso da região dos Grandes Lagos na fronteira dos Estados Unidos e Canadá, é adotado o LWD (*Lower Water Datum*),

⁴ Correções aplicadas aos termos fundamentais da expressão da Maré Estática em função do movimento de retrogradação dos nodos lunares (FRANCO, 1997)

baseado em análises de médias mensais do nível do mar (MILLS e GILL,2005,p.267). No Brasil o plano que define o NR é dado pela média das mais baixas baixamares de sizígia (MLWS). Visando uma padronização mundial, foi adotado pela IHO o plano definido pela LAT (*Lowest Astronomical Tide*) como padrão internacional para o NR (IHO, 2005). Alguns planos de variação de marés são apresentados na FIGURA 9.

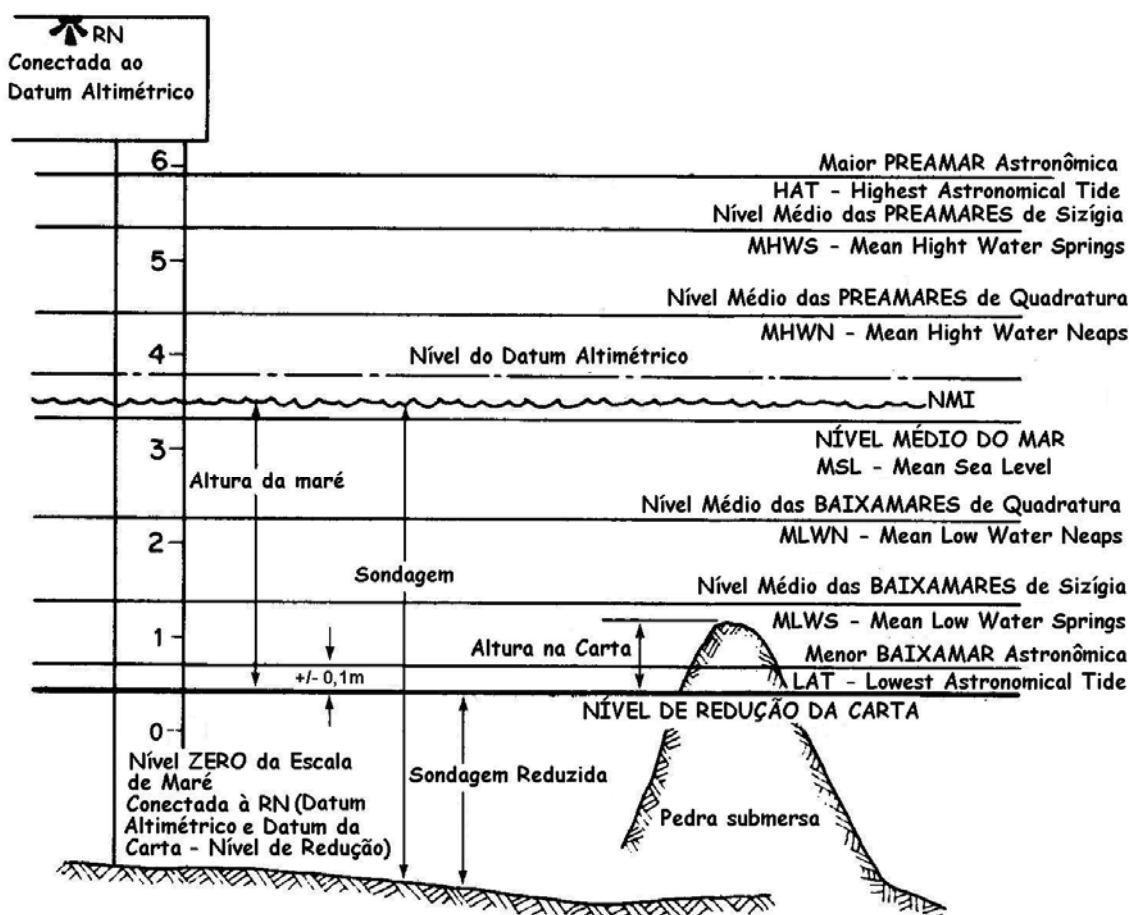


FIGURA 9 – NÍVEIS DE MARÉ E NÍVEL DE REDUÇÃO DA CARTA NÁUTICA
FONTE: Adaptado de INGHAM (1984)

O LAT é definido como o nível de maré mais baixo previsto para ocorrer, sob condições meteorológicas médias e quaisquer combinações de condições astronômicas. Deve ser calculado para um período mínimo de 19 anos, a partir de componentes harmônicas obtidas a partir de um período mínimo de um ano (IHO,2005). Em alguns países europeus a adoção do LAT significou uma redução de até 50 cm nas profundidades reduzidas, e um conseqüente acréscimo de mesmo valor nas previsões lançadas nas Tábuas de Marés. No Brasil ainda não há estudos

de impacto da adoção do novo plano (LAT), porém sua implantação implicaria em elevados custos, já que seria necessária a reedição de todas as Cartas Náuticas sob a responsabilidade da Marinha, assim como das Tábuas de Marés.

A adoção do plano do MLWS como NR não exclui a possibilidade da obtenção de profundidades negativas. O Nível de Redução é calculado por meio de uma combinação matemática das amplitudes (H_j) das componentes harmônicas principais ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$), em função da classificação da maré dada pelo critério de COURTIER (1938), apresentado na Tabela 5. Para áreas de marés com características semidiurnas com desigualdades diurnas, o NR é obtido de acordo com BALAY (1952).

O NR pode ser definido estatisticamente, de acordo com PUGH e VASSIE⁵ (1978) citado por FRANCO (1997), tal que, de acordo com a estatística da previsão, efetuada com todas as componentes fornecidas pela análise e não rejeitadas por teste estatístico, forneça, no máximo, um percentual pré-definido de valores negativos.

TABELA 5 – CRITÉRIO DE COURTIER PARA CLASSIFICAÇÃO DE MARÉ

Desigualdade	Classificação	Altura abaixo do NM
$0 \leq C \leq 0,25$	Maré semidiurna (2 PM e BM por dia)	$H(M_2) + H(S_2) + H(N_2) + H(K_2)$
$0,25 \leq C \leq 1,5$	Maré semidiurna com desigualdades diurnas (2PM e 2BM desiguais)	BALAY (1952)
$1,5 \leq C \leq 3$	Maré mista (2PM e 2BM ou 1PM e 1BM por dia)	$H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1)$
$C > 3$	Maré diurna (1PM e 1BM por dia)	$H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1) + H(P_1)$

FONTE: FRANCO (1997)

Onde:

$$C = \frac{H(O_1) + H(K_1)}{H(M_2) + H(S_2)} \quad (2.13)$$

onde H_j é a amplitude da componente harmônica.

⁵ PUGH, D. T., VASSIE, J. M. Extreme sea levels from tide and surge probability. **Proceedings 16 th Coastal Eng. Conf.** ASCE, Hamburg, p. 911-930, 1978

Segundo BALAY(1952), o valor de Z_0 para a maré semidiurna com desigualdades diurnas dependerá do valor da expressão:

$$2K = G(M_2) - [G(O_1) + G(K_1)] \quad (2.14)$$

e será dado pela Tabela 6:

TABELA 6 - CÁLCULO DE ALTURA DO NR ABAIXO DO NMM PARA MARÉS SEMIDIURNAS COM DESIGUALDADES

Valor de $2K$	Altura abaixo do NM
$2K = 0^\circ$ (maré semidiurna com BM iguais)	$Z_0 = H(M_2) + H(S_2) + H(N_2)$
$2K = 180^\circ$ (maré semidiurna com PM iguais)	$Z_0 = H(M_2) + H(S_2) + H(N_2) + H(K_1) + H(O_1)$
$2K \neq 180^\circ$ e $\neq 0^\circ$ (maré semidiurna com grandes variações de amplitudes)	$Z_0 = H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1) + H(P_1)$

FONTE: BALAY (1952)

As alturas das marés observadas em determinada estação refletem apenas as variações do nível do mar em sua região próxima, o que poderá não ser representativo para toda a área onde se esteja realizando o levantamento. Neste caso, deve ser realizado um transporte do NR da estação maregráfica para a área de trabalho, ou então estabelecer novas estações maregráficas, de modo a permitir uma interpolação dos dados.

A precisão do NR é função do comprimento da série temporal de observação maregráfica. SWANSON (1974) estimou alguns valores para a costa dos Estados Unidos, conforme demonstrado na FIGURA 10. A NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) tem adotado um erro de 8 cm, baseado em observações de um mês, para a costa do Pacífico e do Atlântico, e de 11 cm, para o Golfo do México (MILLS e GILL, 2005,p.275). Não há estudos no Brasil a este respeito, porém segundo FERNANDES (2005), a experiência hidrográfica tem demonstrado que se pode admitir uma precisão de 5 cm, baseado em séries temporais com um ano de observações e, de 10 cm, considerando-se 32 dias de observação.

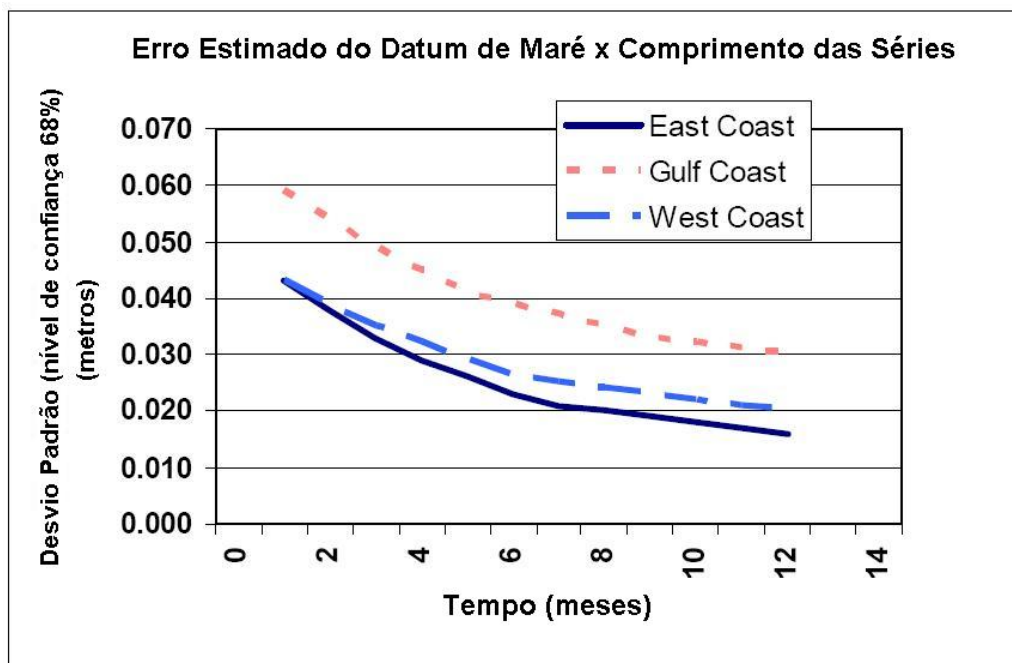


FIGURA 10 – ERROS ESTIMADOS NA DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE REDUÇÃO
 FONTE: Adaptado de SWANSON (1974)

2.1.5 Integração dos sistemas empregados em Levantamentos Hidrográficos

O controle do posicionamento dinâmico de uma embarcação sempre representou uma das maiores dificuldades em Levantamentos Hidrográficos, em razão da dificuldade de se efetuar medições repetidas, para um posterior ajustamento ou melhoria da precisão. Os procedimentos clássicos são baseados em métodos visuais, a partir de medidas angulares, métodos eletrônicos ou astronômicos. Com o advento do GPS, e sobretudo, de seus métodos diferenciais, melhorou a qualidade das posições das sondagens, obtidas usualmente através de métodos acústicos.

Distinguem-se três sistemas principais empregados em levantamentos hidrográficos:

- sistema de posicionamento, no caso, por meio dos métodos de posicionamento por satélite;
- sistema acústico de batimetria; e
- sistema inercial.

A FIGURA 11 apresenta uma configuração de sensores referenciados a um sistema tridimensional fixo à embarcação de sondagem.

A origem deste sistema situa-se preferencialmente no centro de massa da embarcação, na altura da linha d'água estática, definida de acordo com as características de cada embarcação. O eixo "x" é orientado longitudinalmente no sentido popa – proa, considerado positivo na direção do deslocamento. O eixo "y" é perpendicular ao eixo "x" no sentido transversal, convencionado positivo na direção de boreste (lado direito). O eixo "z" completa o sistema levógiro, e é orientado para o topo da embarcação.

As rotações em torno dos eixos definem a situação de equilíbrio, e são denominadas: balanço (*roll*), em torno do eixo "x", caturro (*pitch*), em torno do eixo "y" e guinada (*yaw*), quando em torno do eixo "z". As translações podem ser ignoradas, desde que o problema do sincronismo entre os sistemas esteja resolvido (KRUEGER, 1999).

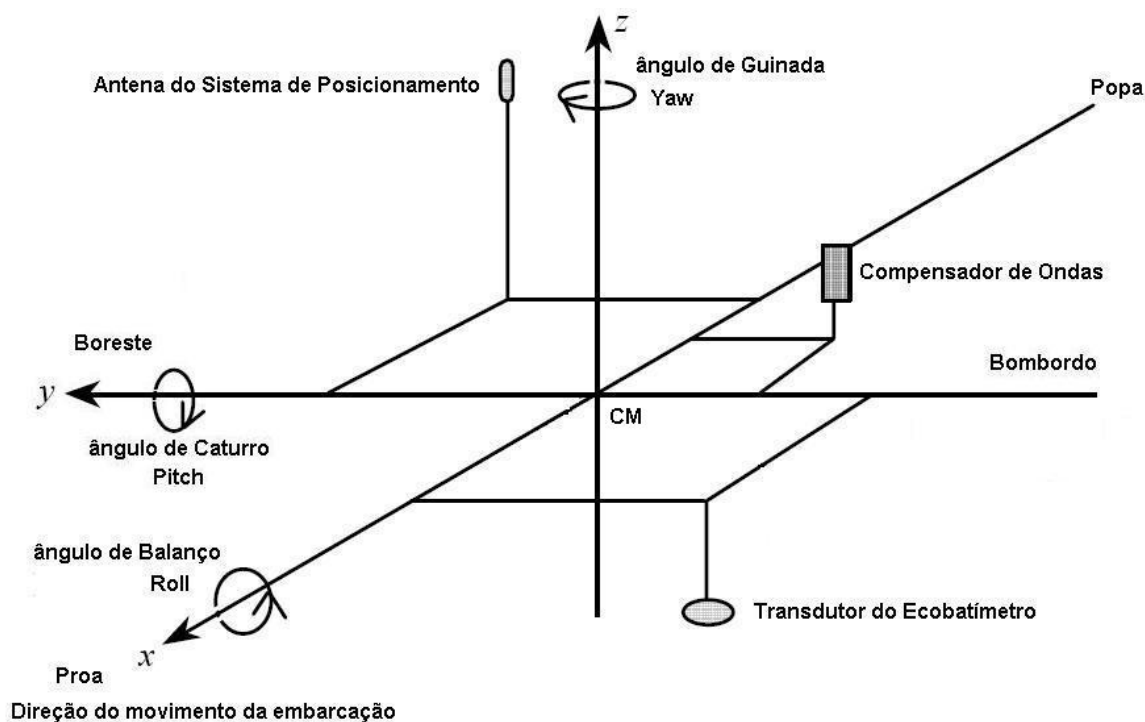


FIGURA 11 – SISTEMA TRIDIMENSIONAL DE COORDENADAS CARTESIANAS DA EMBARCAÇÃO, COM ORIGEM NO CENTRO DE MASSA DA EMBARCAÇÃO
FONTE: Adaptado de HARE (2001)

A obtenção de resultados com precisão compatível com a fornecida pela técnica RTK depende do correto alinhamento dos sistemas entre si (relativo) e em relação ao sistema de referência da embarcação (SRE) (absoluto). O alinhamento absoluto dos sensores deveria ser realizado com a embarcação totalmente estável,

o que nem sempre é possível. A partir de então são gerados vetores das posições da antena e do transdutor. É desejável que o sensor do sistema inercial esteja posicionado na origem do SRE. Estes vetores são denominados *offsets* dos respectivos sensores. O alinhamento relativo está associado aos erros de sincronismo entre os sistemas em função da:

- a) latência entre os sensores, devida às diferenças entre os tempos de processamento das observações e a saída dos dados para os sistemas de aquisição automática ; e
- b) diferenças entre as marchas dos relógios dos sistemas de posicionamento por satélite, batimétrico e inercial.

Atualmente a diferença de marcha dos relógios é compensada pelos programas de aquisição automática, que utilizam o tempo UTC fornecido pelo GPS para sincronização. Já a latência é minimizada por calibrações anteriores ao levantamento (KRUEGER,1999), realizadas através do *Patch Test* (CLARKE,2003) ou Testes de Latência (USACE, 2004).

Uma vez determinado o correto alinhamento dos sistemas é possível transferir as coordenadas cartesianas da antena GPS para o ponto de referência de onde são tomadas as sondagens, conhecendo-se os *offsets* dos sensores e aplicando as correções de atitude da embarcação providas pelo sensor inercial.

2.2 REDUÇÕES BATIMÉTRICAS

De modo a atingir o propósito principal dos LH conduzidos pela DHN, ou seja, a segurança da navegação, de acordo com as especificações recomendadas pela IHO, devem ser aplicadas às sondagens observadas algumas correções, as quais podem ser subdivididas em (DHN,1998a):

Correção instrumental

Realizada para ajustagem do ecobatímetro de forma a coincidir o zero da escala de leitura com o momento da emissão do som.

Correção da posição do transdutor

A sondagem será corrigida sempre de um valor positivo, correspondente à imersão do transdutor, isto é, a distância entre a superfície da água e a parte inferior do transdutor. O valor da correção é obtido a partir das marcas de calado, planos do navio, tabela de correção em função dos calados AV (avante) e AR (a ré), ou medida direta, para transdutores portáteis instalados pela borda.

Correção dos movimentos da embarcação

Devida à mudança de direção do feixe acústico, podendo desta forma, ser adquirida pelo equipamento uma profundidade que não é a da vertical do transdutor. Para eliminação desse erro deve-se utilizar sensores especiais integrados a uma plataforma estabilizada mecanicamente ou eletronicamente, ligadas ao transdutor.

Correções das condições ambientais

Compreendem as correções devidas às variações da velocidade do som e da maré. Redução de sondagens batimétricas é a correção aplicada em função dos efeitos de maré, com o propósito de referir as sondagens ao Datum da Carta ou Nível de Redução (NR).

2.2.1 Reduções Batimétricas Convencionais (T1)

Este processo, apresentado na FIGURA 12, subentende o cálculo prévio das correções de maré (equação 2.16), dadas pelas distâncias entre o Nível do Mar Instantâneo (NMI) e o NR, a serem subtraídas das profundidades observadas.

$$P_r = P_m(t) + D_m(t) - T_1(t) \quad (2.15)$$

sendo que:

$$T_1(t) = A_m(t) - (S_0 - Z_0) \quad (2.16)$$

onde:

P_r - profundidade reduzida.

P_m - profundidade observada no instante t .

T_1 - correção de maré reduzida no instante t .

D_m - variação dinâmica de calado⁶ da embarcação para o instante t .

A_m - altura da maré no instante t , lida na Estação Maregráfica.

S_0 e Z_0 - constantes da Estação Maregráfica, determinadas a partir de sua análise harmônica. Correspondem à altura do NMM em relação ao ZERO da régua e altura do NR abaixo do NMM, respectivamente.

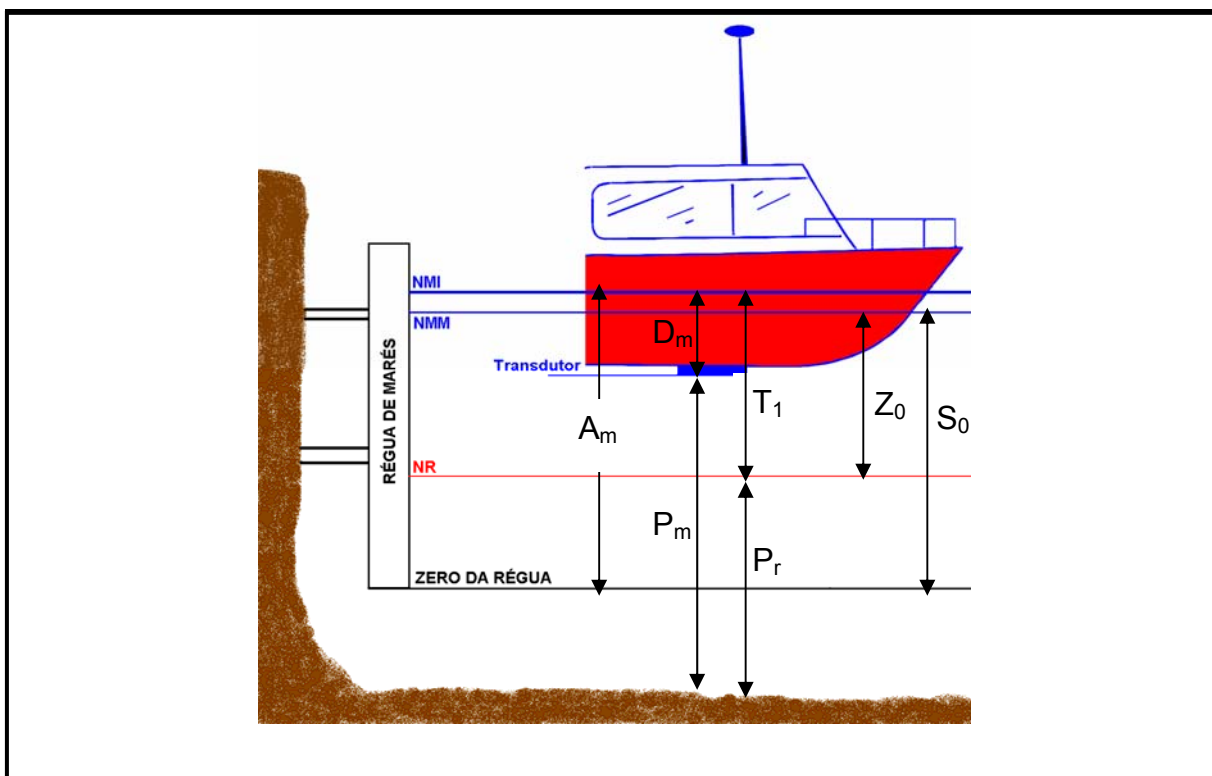


FIGURA 12 - REDUÇÕES BATIMÉTRICAS CONVENCIONAIS

O intervalo de amostragem das profundidades medidas pelo ecobatímetro é da ordem de segundos, enquanto o intervalo de amostragem necessário para registrar variações perceptíveis na altura da maré é da ordem de dezena de minutos. Sendo assim, agrupam-se as correções de sondagem em torno de valores médios, para um determinado intervalo de tempo, de acordo com a precisão necessária para

⁶ distância vertical entre a superfície da água e a parte mais baixa do navio naquele ponto (FONSECA,2002).

cada tipo de levantamento. Os intervalos são definidos em função da forma da curva de maré observada. Desta forma são gerados os Diagramas de Redução de Profundidades (DRP), conforme a FIGURA 13, ao final de cada dia de sondagem, a partir das leituras coletadas na estação maregráfica. A DHN adota um critério que despreza as frações correspondentes até $\frac{1}{4}$ da unidade de correção utilizada, de modo que o erro máximo da redução não seja superior ao decímetro (DHN, 1998a).

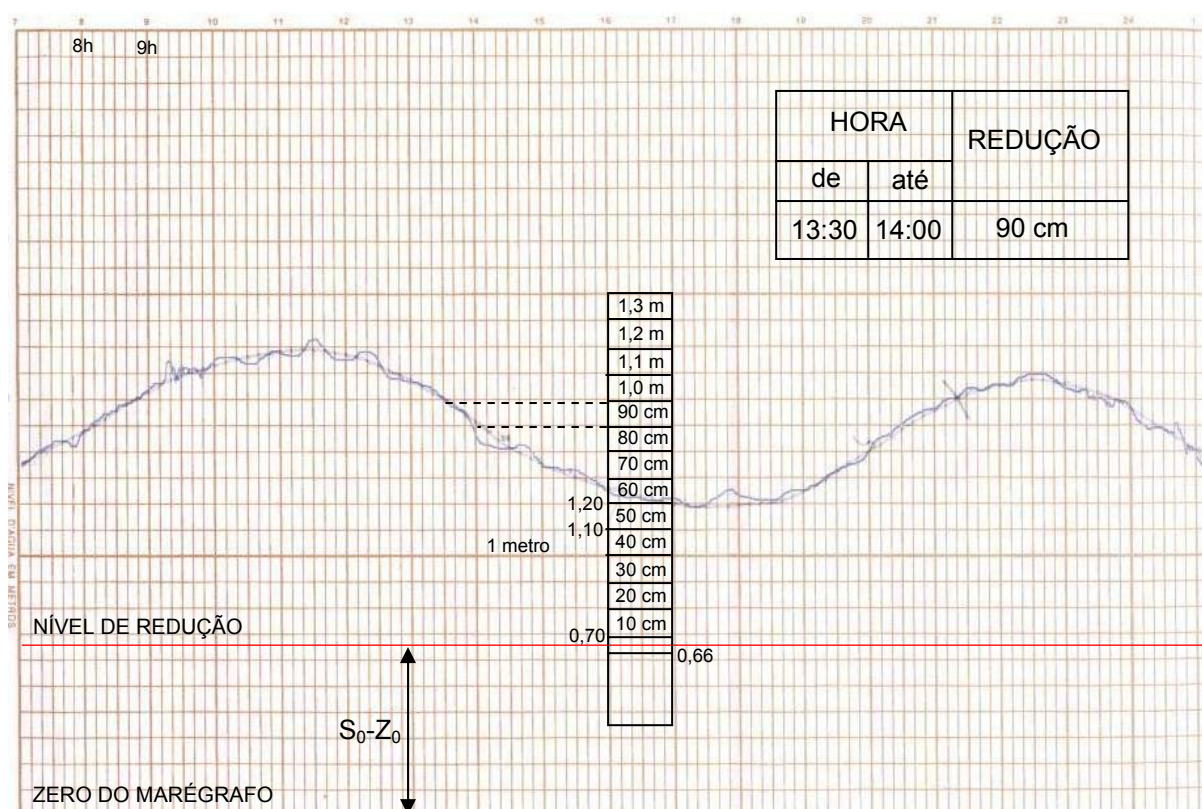


FIGURA 13 - DIAGRAMA DE REDUÇÃO DE PROFUNDIDADES

Alguns programas de aquisição automática geram arquivos de correções de marés a partir das observações, a intervalos regulares, realizadas na estação maregráfica de referência.

2.2.1.1 Transporte de Nível de Redução

Segundo DHN (1998a), quando não se dispõe de séries temporais com mais de 10 dias, é possível o cálculo do NR em um ponto qualquer, a partir do transporte do NR de uma estação maregráfica de referência, com no mínimo uma série

temporal de observações de 32 dias, desde que ambas possuam as mesmas influências ambientais, que pode ser verificado pela análise espectral de correlação cruzada. Normalmente o transporte é calculado através de observações simultâneas durante o período de sizígia, por pelo menos 3 dias consecutivos, conforme a FIGURA 14. Dependerá do tipo de influência da maré local, que poderá ser:

a) de preponderância semidiurna:

$$\frac{\pi.H(S_2)}{2.[H(K_1)+H(O_1)]} \geq 1 \quad (2.17)$$

b) de forte influência diurna:

$$\frac{\pi.H(S_2)}{2.[H(K_1)+H(O_1)]} < 1 \quad (2.18)$$

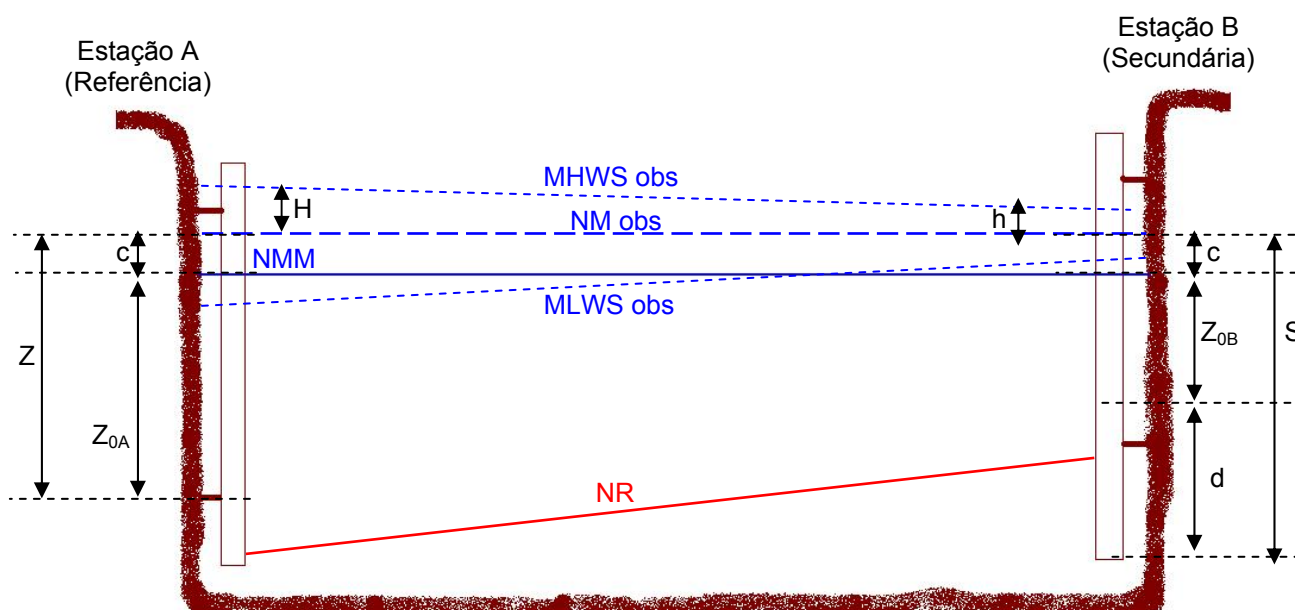


FIGURA 14 - TRANSPORTE DO NÍVEL DE REDUÇÃO
FONTE: Adaptado de NOGUEIRA⁷ (2006)

Em função da maioria das marés no Brasil ser do tipo de preponderância semidiurna somente o primeiro método será abordado neste trabalho.

O transporte de NR em áreas de marés com preponderância semidiurna pressupõe três hipóteses:

1) O NMM é o mesmo em ambas as estações;

⁷ NOGUEIRA, G. (2006), Notas de Aula do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais

- 2) A razão entre o Z_0 (FIGURA 14) e a amplitude em ambas as estações é constante; e
- 3) A amplitude de maré varia linearmente entre as estações.

É necessário que as observações simultâneas sejam no período de sizígia para redução das desigualdades diurnas e para que a maré se aproxime mais do NR.

Da FIGURA 14 e de acordo com a hipótese (2):

$$\frac{Z_{0B}}{h} = \frac{Z_{0A}}{H} \Rightarrow Z_{0B} = \frac{h}{H} Z_{0A} \quad (2.19)$$

A altura do NR (d) na estação B sobre o ZERO da régua é dada por:

$$d = S - Z_{0B} - c \Rightarrow d = S - Z_{0B} - (Z - Z_{0A}) \quad (2.20)$$

onde:

S é a altura do NM observado em relação ao ZERO da régua na estação secundária (B), dada por:

$$S = \frac{(h_1^B + 2h_2^B + 3h_3^B + 4h_4^B + 3h_5^B + 2h_6^B + h_7^B)}{16} \quad (2.21)$$

sendo:

$h_1^B, h_3^B, h_5^B, h_7^B$ - amplitudes das baixamars de sizígia observadas; e

h_2^B, h_4^B, h_6^B - amplitudes das preamars de sizígia observadas.

Z é a altura do NM observado em relação ao NR na estação de referência (A), dada por:

$$Z = \frac{(h_1^A + 2h_2^A + 3h_3^A + 4h_4^A + 3h_5^A + 2h_6^A + h_7^A)}{16} \quad (2.22)$$

sendo:

$h_1^A, h_3^A, h_5^A, h_7^A$ - amplitudes das baixamares de sizígia observadas; e

h_2^A, h_4^A, h_6^A - amplitudes das preamares de sizígia observadas.

Substituindo a (2.19) na (2.20), tem-se:

$$d = S + Z_{0,A} \left(1 - \frac{h}{H} \right) - Z \quad (2.23)$$

onde H e h são as amplitudes de marés observadas nas estações de referência e secundária, respectivamente. Dados pelas expressões:

$$H = \frac{MHWS_{obs}^A - MLWS_{obs}^A}{2} \text{ e } h = \frac{MHWS_{obs}^B - MLWS_{obs}^B}{2} \quad (2.24)$$

onde:

$$MHWS_{obs}^A = \frac{h_2^A + 2h_4^A + h_6^A}{4} \text{ e } MLWS_{obs}^A = \frac{h_1^A + 3h_3^A + 3h_5^A + h_7^A}{8}; \text{ e}$$

$$MHWS_{obs}^B = \frac{h_2^B + 2h_4^B + h_6^B}{4} \text{ e } MLWS_{obs}^B = \frac{h_1^B + 3h_3^B + 3h_5^B + h_7^B}{8}.$$

2.2.1.2 Subáreas de Redução

A subdivisão em áreas de redução é uma ferramenta utilizada para extrapolar, ou interpolar, a maré ou as variações do nível do mar para a área de levantamento a partir das características de marés de um ponto conhecido na costa, utilizando suas diferenças de fase e amplitudes (MILLS e GILL, 2005, p.277). Por vezes a área a ser levantada é muito extensa, havendo diferentes NR no seu interior. É necessária uma subdivisão da área, a fim de se evitar “degraus” entre os diferentes níveis de redução acima de uma tolerância pré-estabelecida entre as áreas (DHN, 1998a). As reduções de sondagem do efeito de maré são realizadas em função da altura de maré observada em uma estação maregráfica próxima ou no interior da área de sondagem. Isto pode proporcionar erros porque nem sempre o NR no local de sondagem é o mesmo da estação maregráfica. É necessário realizar um estudo

prévio em outros pontos, a fim de se verificar possíveis diferenças de NR e / ou fase de maré.

É recomendável que se faça subdivisão de áreas em locais em que prevaleçam as mesmas influências externas (maré, vento, pressão, rio), mantendo assim suas características. Um modo prático de saber se a maré tem as mesmas características é comparar as curvas de maré obtidas em alguns pontos da área, através de uma análise visual. É importante lembrar que a maré varia conforme a configuração geográfica do lugar. Por exemplo: as marés no interior e fora de uma baía são geralmente diferentes. Ou seja, não é recomendável reduzir as sondagens fora de uma baía utilizando um marégrafo dentro da baía e vice-versa.

Um outro parâmetro necessário para a subdivisão de uma área de sondagem é a distância entre duas estações maregráficas. A distância deve ser tomada ao longo da direção de propagação da maré.

Tendo em vista que a onda de maré é, por suas características, classificada como onda longa de gravidade, pode-se estimar a diferença de fase (Δt) da maré entre dois pontos (A e B), utilizando a expressão:

$$\Delta t = \frac{d_{AB}}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (2.25)$$

onde:

d_{AB} - distância entre os pontos A e B;

h - profundidade média do mar; e

g - valor médio da aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Esta diferença de fase deve ser comparada com um valor de tolerância de tempo (τ), que representa o intervalo de tempo decorrido para que ocorra uma variação máxima pré-estabelecida (ν) em função da precisão dos ecobatímetros, normalmente entre 5 e 10 cm. Logo o número de subáreas determinado pela diferença de fase (N_T) entre dois pontos é dado por:

$$N_T = \frac{\Delta t}{\tau} + 1 \quad (2.26)$$

Quando se dispõe de informações de maré em mais de um ponto no interior da área, pode-se comparar os diferentes valores de Z_0 , e verificar se estas diferenças são superiores a tolerância (ν).

O número de subáreas de redução (N_z) é dado por:

$$N_z = \frac{\Delta Z_0}{\nu} + 1 \quad (2.27)$$

onde:

$$\Delta Z_0 = |Z_{0A} - Z_{0B}| \quad (2.28)$$

O número de subáreas deverá levar em consideração tanto as diferenças de fase quanto as diferenças em amplitude de maré, sendo igual a $\begin{cases} N_z \Leftrightarrow N_z > N_T \\ N_T \Leftrightarrow N_z < N_T \end{cases}$

Cada subárea terá uma extensão (L), em função da distância d entre as estações maregráficas localizadas nos pontos extremos da área, e do número (N_a) de subáreas:

$$L = \frac{d}{N_a - 1} \quad (2.29)$$

As correções de maré para cada subárea de redução no instante t são obtidas pela altura do nível do mar instantâneo sobre o NR (h_x), dadas por:

$$h_x(t) = F_A [h_A(t \pm \Delta t) - Z_{0A}] + Z_{0X} \quad (2.30)$$

onde:

h_A - altura do nível do mar instantâneo na estação de referência A.

Δt - diferença de fase entre a subárea X e a estação de referência. Terá sinal positivo se a maré ocorrer primeiro em X, e negativo, caso a maré ocorra primeiro em A.

Z_{0X} - altura do NR na subárea X abaixo do NMM;

Z_{0A} - altura do NR na subárea A abaixo do NMM;

F_A - fator de amplitude, dado por:

$$F_A = \frac{Z_{0X}}{Z_{0A}} \quad (2.31)$$

O Serviço Hidrográfico da Marinha Australiana (*Hydrographic Office RAN*) adota uma técnica de interpolação ponderada a partir de um sistema de estações maregráficas. Os pesos aplicados a um determinado ponto são proporcionais às distâncias às estações maregráficas próximas e a área de um setor triangular subentendido por estas estações. O *Maritime Safety Queensland*, também da Austrália, utiliza o processo de subdivisão da área em zonas ao longo dos canais navegáveis, interpolando as correções de maré a partir de observações realizadas em duas estações maregráficas nos extremos do canal. O Serviço Hidrográfico da NOAA (*NOAA Office of Coast Survey*) adota uma separação em zonas semelhante à utilizada pela DHN (RAYMOND e BROADBENT, 2004). Este modelo de separação de zonas de redução está sendo substituído pelo método TCARI (*Tidal Constituent And Residual Interpolation*), que executa uma interpolação espacial das constantes de amplitude e fase das componentes harmônicas e dos resíduos provenientes de efeitos não relacionados com a maré. O modelo emprega condições de contorno e seu *grid* permite uma variação mais suave NR no interior da área (CISTERNELLI e GILL, 2005). O método TCARI permite a criação de modelos digitais de elevação para suporte a levantamentos cinemáticos em tempo real (HESS, 2003), através da determinação da variação da separação entre o elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150 e o NR da área, o que permite a realização das reduções batimétricas a partir das altitudes elipsoidais RTK.

2.2.2 Reduções Batimétricas GPS RTK (T_2)

As maiores fontes de erros presentes na profundidade reduzida são oriundas do processo de redução de marés e correções de atitude. Isto ocorre muitas vezes porque os efeitos de maré e atitude, sobretudo o efeito *heave* (seção 2.2.3), são medidos de forma independente, o que gera imprecisão na etapa de pós-processamento, uma vez que, na prática, estes efeitos estão combinados no nível do mar para um determinado instante (SCARFE, 2002). Tipicamente os erros em

função das correções de marés chegam a 10cm, para levantamentos de Ordem Especial, e de 20 a 30cm em levantamentos de Primeira Ordem (NORDEN et al.,2005). As precisões das correções de maré podem ser melhoradas com a aplicação da técnica RTK (USACE, 2004), uma vez que as observações maregráficas serão substituídas pela variação das altitudes elipsoidais da antena. Há também uma minimização dos erros de arredondamento do DRP (Diagrama de Redução de Profundidades) e cotidais, já que as altitudes elipsoidais representam a oscilação de maré no local exato do levantamento.

REMONDI et al. (1992) dizia que as correções de marés em tempo real empregando solução OTF eram possíveis. Medidas de marés pela técnica RTK também foram investigadas por KIELLAND e HAGGLUND (1995) e DE LOACH (1995). ASHKENAZI et al. (1990) também investigaram o uso do GPS para observação de maré, porém no contexto de estações maregráficas de longo período.

A determinação da separação vertical entre o NR local e o elipsóide de referência é o que permite a execução do levantamento RTK, dispensando o uso de estações maregráficas na costa (IHO, 2005). Os erros cotidais, em função da divisão em subáreas de redução, são substituídos por erros associados com a determinação do relacionamento entre o elipsóide de referência e o NR local, no interior da área (WONG et al., 2000). A separação entre WGS-84 G1150 e NR tem sido refinada em todo o mundo, gerando modelos locais de separação similares às alturas geoidais (CLARKE et al.,2005).

A validação da aplicação da técnica RTK na redução batimétrica depende de uma análise da contribuição de suas incertezas no modelo estatístico da determinação de Erro Total Propagado (seção 2.2.3), porém o controle de qualidade realizado a *posteriori* garante a consistência dos dados coletados, verificando a adequação do levantamento aos padrões mínimos recomendados. Esta qualidade será avaliada empregando as altitudes elipsoidais RTK, e sua aplicação em função do tipo de separação entre o elipsóide de referência e o NR da área, bem como diferentes formas de redução de ruídos das curvas de correções de maré RTK. A separação entre elipsóide de referência e o NR local poderá ser constante ou variável. Neste trabalho as duas hipóteses serão consideradas, admitindo-se linear a variação do NR entre duas estações maregráficas de referência, conforme o esquema representado na FIGURA 15.

O plano destacado na FIGURA 15 representa a variação linear do nível de redução entre as estações maregráficas da Ilha Fiscal e Ponta da Armação, em função dos diferentes valores das separações NR - WGS-84 G1150 (β_A e β_B). Da FIGURA 15 é possível perceber que a separação NR - WGS-84 G1150 varia linearmente ao longo das coordenadas UTM (E) da embarcação, dada a disposição das linhas de sondagem nos sentidos ortogonais Norte-Sul e Leste-Oeste, representadas pelo reticulado na figura. Portanto as correções de marés GPS RTK (T_2) sofrerão uma variação em função do tempo (t), devido ao efeito de maré observado pelas variações das altitudes elipsoidais da antena GPS, e também em função da coordenada UTM (E) da embarcação de sondagem no mesmo instante (t).

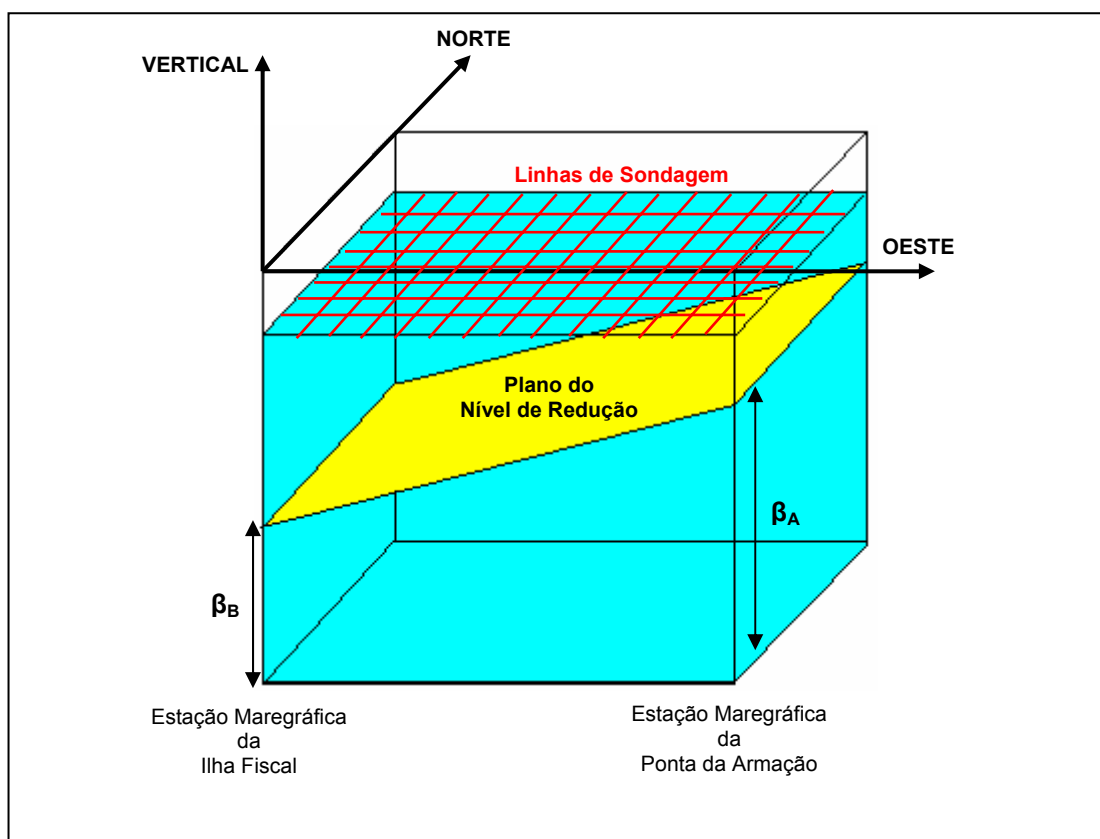


FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO LINEAR DO NÍVEL DE REDUÇÃO NA ÁREA DE SONDADEM

A FIGURA 16 representa uma seção vertical de uma linha de sondagem no sentido Oeste-Leste, ou seja, o deslocamento da embarcação de sondagem entre a extremidade oeste da área de sondagem, próxima à estação maregráfica da Ponta da Armação, até a extremidade Leste, próxima a estação maregráfica da Ilha Fiscal. Durante a realização das linhas de sondagem no sentido Norte-Sul, as alterações

nas correções T_2 introduzidas pelas alterações nas coordenadas UTM (E) serão mínimas.

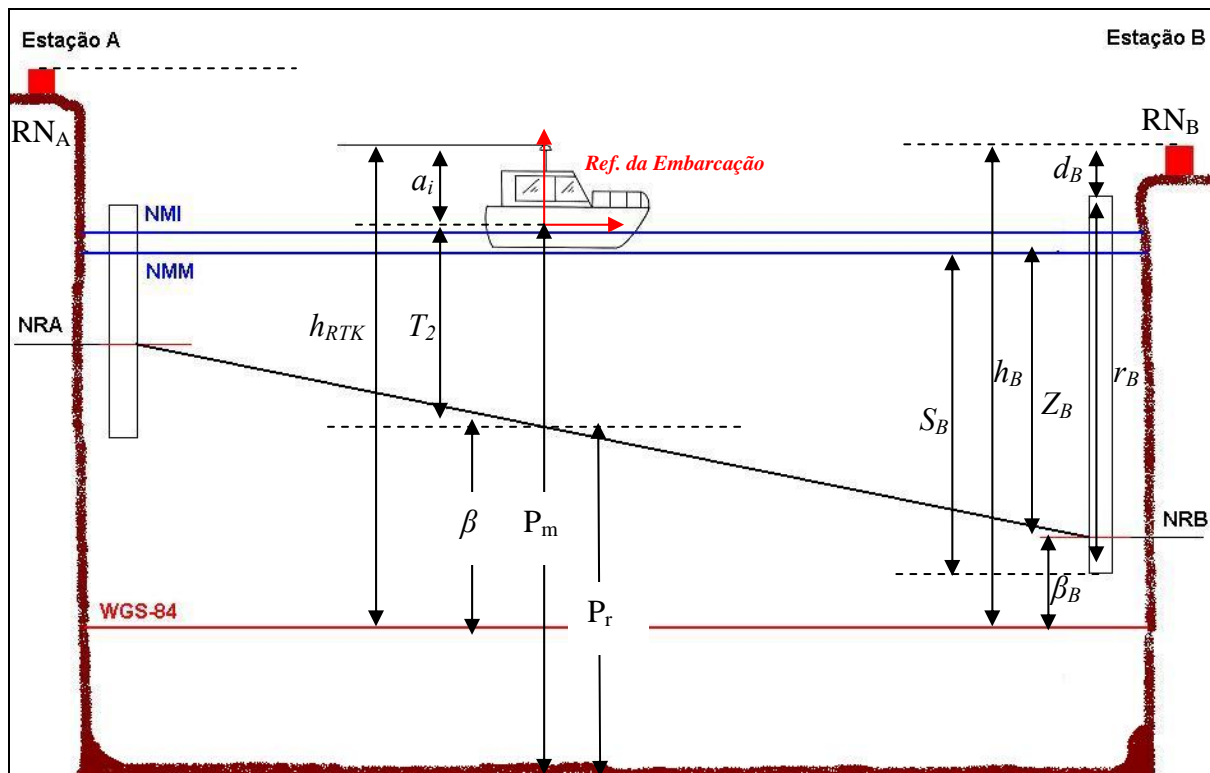


FIGURA 16 - SEÇÃO VERTICAL DE UMA LINHA DE SONDAÇÃO NO SENTIDO OESTE-LESTE EMPREGANDO REDUÇÕES BATIMÉTRICAS COM NR VARIÁVEL

Da FIGURA 16, a profundidade reduzida (P_r) no instante t e coordenadas UTM (N, E) da embarcação de sondagem será:

$$P_r = P_m(t) - T_2(t, E) \quad (2.32)$$

onde:

$P_m(t)$ é a sondagem observada num instante t ;

$T_2(t, E)$ corresponde à correção de maré RTK para o instante t e posição UTM (N, E).

É dada pela expressão:

$$T_2(t, E) = h_{RTK}(t) - \beta(E) - a_i \quad (2.33)$$

onde:

$h_{RTK}(t)$ - altitude elipsoidal da antena do GPS no instante t ;

a_i - altura da antena GPS sobre a origem do referencial da embarcação; e

$\beta(E)$ - expressão da altura do NR em relação ao elipsóide de referência, em função da coordenada E da embarcação de sondagem. Corresponde à equação da reta que une os pontos (β_A, E_A) e (β_B, E_B) , sendo que:

$$\begin{aligned}\beta_B &= h_B - (r_B + d_B) + (S_B - Z_B) \\ \beta_A &= h_A - (r_A + d_A) + (S_A - Z_A)\end{aligned}\quad (2.34)$$

onde:

h_B, h_A - altitudes elipsoidais das RRNN;

r_B, r_A - comprimento das réguas;

d_B, d_A - desníveis entre as réguas e as RRNN;

S_B, S_A - Alturas do NMM nas estações maregráficas; e

Z_B, Z_A - alturas dos NR abaixo do NMM nas estações maregráficas.

Logo a função da variação da altura do NR em relação ao elipsóide de referência será:

$$\beta(t, E) = \frac{(\beta_A - \beta_B)}{(E_A - E_B)} \cdot E + \frac{(\beta_B \cdot E_A - \beta_A \cdot E_B)}{(E_A - E_B)} \quad (2.35)$$

Substituindo a expressão (2.35) e (2.33) em (2.32) tem-se a função que permite determinar o valor da profundidade reduzida para um determinado instante t , considerando uma variação linear da altura do NR em relação ao elipsóide de referência:

$$P_r = P_m(t) - h_{RTK}(t) + \frac{(\beta_A - \beta_B)}{(E_A - E_B)} \cdot E(t) + \frac{(\beta_B \cdot E_A - \beta_A \cdot E_B)}{(E_A - E_B)} + a_i \quad (2.36)$$

2.2.3 Análise de qualidade da profundidade reduzida

No estudo dos levantamentos batimétricos devem ser feitas distinções entre as palavras “sondagem” e “profundidade”. Sondagem corresponde a uma estimativa da profundidade local, que é tomada a partir de algum equipamento (ecobatímetro, LIDAR - *Light Detection And Ranging* ou prumo de mão), à qual são aplicadas várias correções, que podem ser valores observados (ângulos de atitude, variações dinâmicas de calado etc), ou processos (determinação de subáreas de redução e correções de velocidade do som) (WELLS, 2005). Esta estimativa é eivada de ruídos, denominados incertezas do valor verdadeiro da profundidade reduzida dada pela expressão:

$$P_r = \frac{1}{2} v.t + \kappa + D_m + \varepsilon \quad (2.37)$$

onde:

P_r = profundidade reduzida (referida a um Nível de Redução);

v = velocidade média de propagação do som na água;

t = intervalo de tempo transcorrido entre a emissão do feixe acústico pelo transdutor e o retorno do respectivo eco ao mesmo transdutor, ou transdutor de recepção;

κ = índice de correção instrumental para o ecobatímetro;

D_m = profundidade de imersão do transdutor; e

ε = outras correções, tais como: variações dinâmicas de calado, erros de observação de marés e estabelecimento do NR e aplicação da redução de maré.

O somatório das incertezas presentes na profundidade reduzida constitui o Erro Total Propagado (ETP), e deve ser estimado através de modelos estatísticos (IHO, 1998). O ETP deverá ser menor que o Erro Máximo Permitido (EMP) recomendado para cada tipo de levantamento, de acordo a Publicação Especial S-44 (IHO, 1998) da IHO. O EMP é dado por:

$$EMP = \sqrt{a^2 + (b.d)^2} \quad (2.38)$$

onde:

a - soma de todos os erros constantes, ou seja, aquelas incertezas que não dependem da profundidade;

b - fator dos erros que variam em função da profundidade; e
 d - a profundidade local.

Os valores das constantes a e b são tabeladas de acordo com o tipo de levantamento:

TABELA 7 - CONSTANTES PARA CÁLCULO DO ERRO MÁXIMO PERMITIDO

Ordem	Especial	1	2	3
Acurácia das Profundidades Reduzidas (nível de confiança de 95%)	$a=0,25$ m $b=0,0075$	$a=0,5$ m $b=0,013$	$a=1$ m $b=0,023$	$a=1$ m $b=0,023$

FONTE: IHO (1998)

O controle de qualidade do Levantamento é realizado através das linhas de verificação, que devem cruzar as linhas de sondagem regular a ângulos entre 60° e 90° . As diferenças observadas nos pontos de cruzamento devem estar de acordo com o ETP (σ_z) e ser estatisticamente testadas, de modo a garantir a adequação do levantamento aos padrões recomendados pela Tabela 7 (IHO,1998).

O ETP, ao nível de confiança de 68% (1σ), é obtido pela raiz quadrada do somatório das variâncias de todas as parcelas integrantes da equação (2.37), dado pela expressão (ARTILHEIRO,2005,p.163):

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{zv}^2 + \sigma_{zt}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{tide}^2} \quad (2.39)$$

onde:

σ_{zv}^2 - variância da profundidade devida ao erro de medida da velocidade do som e à sua variação temporal e espacial

A variação da velocidade do som é de difícil controle, provocando erros nas medidas de profundidade (dz_c), proporcionais ao erro médio da velocidade do som (dc) e à profundidade local, sendo:

$$dz_v = \frac{1}{2}t.dv \text{ ou } dz_v = \frac{z}{v}.dv \quad (2.40)$$

onde:

dz_v = erro na medida de profundidade devido à velocidade do som na água

t = tempo de propagação do feixe acústico, desde a saída do transdutor, reflexão no fundo e retorno

dv = erro médio da velocidade do som

z = profundidade local

v = velocidade média do som na água

A magnitude do erro médio da velocidade do som na água varia de acordo com a acurácia da determinação da velocidade do som e sua variação temporal e espacial.

A variância da medida de profundidade (σ_{zv}^2) em função dos erros de medida da velocidade do som e de sua variação temporal e espacial é dada por:

$$\sigma_{zv}^2 = \left(\frac{z}{v} \right)^2 (\sigma_{vm}^2 + \sigma_v^2) \quad (2.41)$$

onde:

σ_{vm}^2 = variância da medida da velocidade do som na coluna d'água

σ_v^2 = variância da velocidade do som devido à sua distribuição espacial e temporal

A variação da velocidade do som, temporal e espacial, é a maior fonte externa de erros nas medidas de profundidade (USACE, 2004,p.9-2). Daí a importância de ser considerada, tanto na fase de planejamento como durante a execução de um levantamento.

A velocidade de propagação do som na água poderá ser obtida por:

- medida direta por Digibar ou CTD (erro de 0,17% da velocidade do som medida);
- verificação através da barra de calibração (erro de 0,25%);
- cálculo, por intermédio de sua equação internacional de estado (UNESCO, 1981), conjugando-se medições diretas de temperatura por meio de XBT⁸ (erro de 0,5%) ou

⁸ eXpendable BaThythermograph - dispositivo fabricado pela *Lockheed Martin Sippican*, que registra a temperatura em função da profundidade ao longo de uma coluna d'água.

da temperatura da água à superfície (erro de 0,6%), com medições de salinidade, ou empregando-se valores climatológicos deste parâmetro (PSS-78)⁹.

Os erros estimados estão associados à experiência hidrográfica e carecem de uma verificação científica.

σ_{zt}^2 - variância da profundidade devida ao erro de medida do tempo de propagação do feixe acústico

A operação básica de um ecobatímetro é medir o tempo, convertendo as medidas em profundidades. O erro na medida do tempo (dt) relaciona-se diretamente ao erro em profundidade (dz_t). Em modernos ecobatímetros este erro é pequeno e constante, sendo levado em consideração durante o processo de calibração.

$$dz_t = \frac{1}{2} \cdot v \cdot dt \quad (2.42)$$

O erro principal de medição do tempo está correlacionado ao algoritmo utilizado para detecção do sinal de retorno (eco).

A variância da profundidade, em função do erro de medida do tempo é dada por:

$$\sigma_{zt}^2 = \left(\frac{1}{2} \cdot v \right)^2 \cdot \sigma_{tm}^2 \quad (2.43)$$

onde:

σ_{tm}^2 = variância da medida de tempo.

σ_h^2 - variância da profundidade devido ao efeito heave medido e induzido sobre a posição do transdutor

⁹ PERKIN, R.G.; LEWIS, E.L. The Pratical Salinity Scale 1978: Fitting the data. IEEE Oceanic Eng., OE-5 (1), pp. 9-16, 1980

O efeito *heave* corresponde ao movimento vertical da embarcação provocado pela ação do mar pode ser medido através de sensores inerciais ou compensadores de ondas¹⁰. Entre todos os efeitos que provocam deslocamentos verticais, o *heave* é dominante, podendo variar entre 0,05 a 0,20 metro (FERNANDES, 2005). O compensador de ondas deve ser posicionado, preferencialmente, sobre o transdutor, de modo a medir os efeitos no mesmo eixo vertical do ecobatímetro. Já a instalação de sensores inerciais deve ser próxima ao centro de gravidade da embarcação, sendo conhecidos os vetores entre o centro de gravidade e o transdutor. A partir dos ângulos instantâneos de caturro (*pitch*) e balanço (*roll*), o valor de *heave* medido (h_m), pode ser transferido para a posição do transdutor (h_i), através da aplicação do efeito *heave* induzido (h_i).

Para o cálculo de h_i , deve-se considerar a embarcação como um corpo rígido, livre para rotacionar em torno dos eixos (x, y e z). A rotação em torno do centro de gravidade (caturro e balanço), próximo onde é medido o efeito *heave*, corresponde à variação de profundidade do transdutor, a partir do sistema de referência da embarcação, identificado pelo sobrescrito E, em relação a um sistema de coordenadas locais, sobrescrito L. Esta diferença é denominada efeito *heave* induzido (h_i), dado por HARE e GODIN¹¹, citados por ARTILHEIRO (2005, p. 158) pela expressão:

$$h_i = z_t^L - z_t^E = -x_t^V \cdot \text{sen}(\theta_p) + y_t^V \cdot \cos(\theta_p) \text{sen}(\theta_R) + z_t^V \cdot (\cos(\theta_p) \cos(\theta_R) - 1) \quad (2.44)$$

onde:

θ_R = ângulo de balanço (roll) (FIGURA 17)

θ_p = ângulo de caturro (pitch) (FIGURA 17)

(x_t, y_t, z_t) = coordenadas do transdutor em relação ao referencial da embarcação

O erro total em profundidade, devido ao erro de medida do *heave*, é dado por:

$$dh = dh_m + dh_i \quad (2.45)$$

¹⁰ Equipamento empregado apenas para registrar o movimento vertical da embarcação devido à ação das ondas

¹¹ HARE, R.; GODIN, A. Estimating Depth and Positioning Errors for the Creed/EM 1000 Swath Sounding System. Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference '96. Halifax, pp. 9-16, 1996

onde:

dh_m = erro de determinação do *heave* medido

dh_i = erro de determinação do *heave* induzido

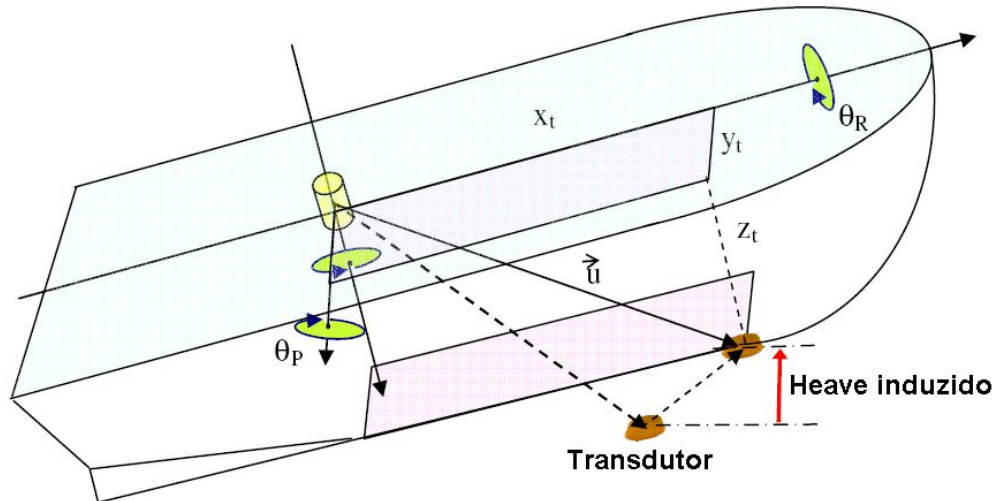


FIGURA 17 – *HEAVE* INDUZIDO
FONTE: Adaptado de ARTILHEIRO (2005)

A variância do efeito *heave* induzido depende das acurácias dos *offsets* do transdutor em relação ao sensor de movimento e dos ângulos de caturro e balanço. A variância da profundidade devido ao efeito *heave* medido e induzido sobre a posição do transdutor é dada por:

$$\sigma_h^2 = \sigma_{hm}^2 + \sigma_{hi}^2 \quad (2.46)$$

onde:

σ_{hm}^2 = variância do *heave* medido

σ_{hi}^2 = variância do *heave* induzido. Esta variância é comparativamente desprezível em relação à anterior.

Quando não houver compensador de ondas disponível, o que pode ser realizado é uma suavização manual do ecograma, o que requer muita prática e perfeito conhecimento do comportamento da topografia do fundo, a fim de não comprometer a representação das feições submarinas. O procedimento básico

consiste em suavizar pela metade da amplitude entre as cristas e vales do ecograma.

Além do efeito *heave*, as variações de atitude também devem ser consideradas. O transdutor mede o retorno do primeiro eco refletido pelo fundo, portanto quanto maior a largura do feixe, menor será o erro na profundidade provocado pela variação de atitude. As contribuições dos efeitos de *roll* e *pitch* são significativas no erro de medição de profundidade, quando estes ângulos forem superiores à metade da largura do feixe acústico. As informações de *heave*, *pitch* e *roll* são fornecidas por sensores inerciais integrados ao ecobatímetro, e gravadas durante os levantamentos em campo, para posterior processamento e correção das sondagens.

σ_i^2 - variância da profundidade em função da posição do transdutor, alterações de calado, efeitos de assentamento e *squat*.

Uma medida acurada da profundidade de imersão do transdutor é fundamental na avaliação da acurácia da profundidade medida, sendo até mesmo necessário atualizar este valor durante os trabalhos de campo. A posição de imersão do transdutor pode ser obtida por: medida direta sobre a haste do transdutor de borda, leitura da escala¹² de calado na posição aproximada do transdutor ou pela média entre as leituras das escalas na proa e popa, ou medida indireta através dos planos da embarcação. Além dos erros inerentes à avaliação da profundidade inicial de imersão (dz_0), há ainda erros provenientes de variações de calado em função de alterações do carregamento da embarcação de sondagem, tais como consumo de combustível e água ($dz_{draught}$). A variação de calado, considerando o mesmo deslocamento da embarcação, aumenta com a diminuição da área de flutuação sobre a superfície do mar. Os erros de calado propagam-se diretamente no erro de profundidade.

O assentamento (*Settlement*) corresponde a um decréscimo do nível da linha d'água de uma embarcação em movimento, comparativamente ao mesmo nível, considerando-se a embarcação parada. O *Squat* é a diferença de nível observada

¹² escalas numéricas escritas no costado para leitura do calado com zero referido ao fundo da embarcação (FONSECA,2002).

entre a proa e a popa de uma embarcação, quando em movimento, gerando um sistema de ondas da proa para popa da embarcação (RAYMOND e BROADBENT, 2004). Estes efeitos são esquematizados nas FIGURAS 18 e 19, respectivamente.

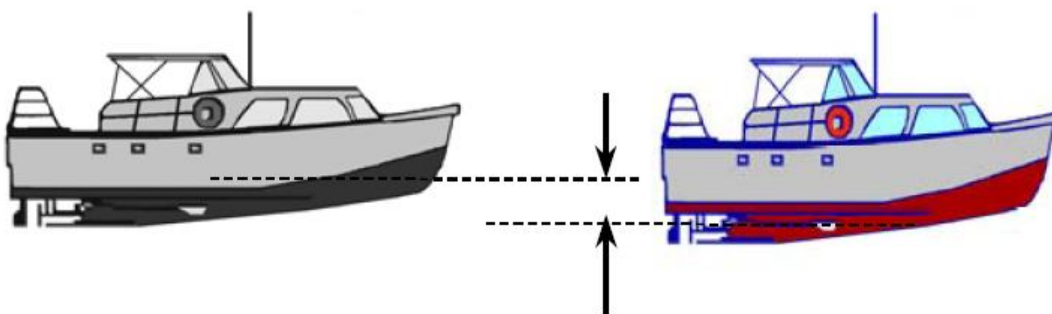


FIGURA 18 - VARIAÇÃO DE CALADO (*SETTLEMENT*)
FONTE: USACE (2004)



FIGURA 19 – VARIAÇÃO DE CALADO (*SQUAT*)
FONTE: USACE (2004)

σ_r^2 - variância da profundidade devida a erros de leitura dos registros do ecobatímetro e em função da sua resolução

A leitura e a resolução dos registros de um ecobatímetro dependem de seu princípio de operação. No caso de um registro analógico, o operador deverá selecionar os parâmetros apropriados do equipamento durante os trabalhos de campo, a fim de obter um registro limpo e com boa resolução. Por outro lado, o registro digital não depende tanto do operador, porém é necessária sua constante supervisão durante o levantamento.

Quando o dado é gravado em papel, é necessário selecionar ganho e intensidade que tornem legível o registro. Também é necessária uma escala vertical com suficiente discriminação, obtida, principalmente, utilizando diferentes amplitudes de escala.

O ecograma deve ser preparado para a leitura. Esta operação consiste em selecionar os pontos do fundo do mar que serão utilizados para leitura de profundidade. Isto é normalmente executado com o auxílio de uma mesa digitalizadora.

O erro associado à leitura dos registros depende da experiência e do cuidado do analista. Considerando um registro em papel com largura de 20 cm, representando uma escala de 0-200 metros, um erro de leitura de 0,5 mm irá provocar um erro em profundidade de 0,5 metro. Conseqüentemente esta escala não é adequada para águas rasas. O erro de leitura é referenciado como dz_{read} , cuja variância é σ_r^2

σ_{tide}^2 - variância da profundidade em função dos erros de observação e redução dos efeitos de maré

Incluem ainda os erros cotidais. A variância da profundidade em função dos efeitos de maré é dada:

$$\sigma_{tide}^2 = \sigma_{tidem}^2 + \sigma_{NR}^2 + \sigma_{DRP}^2 + \sigma_{co-tidal}^2 \quad (2.47)$$

onde:

σ_{tidem}^2 - variância das observações de marés, tomadas nas estações maregráficas. Os erros não devem exceder 5 cm para levantamentos de ordem especial, ou 10 cm para os demais tipos de levantamentos, ao nível de confiança de 95% (IHO,1998).

σ_{NR}^2 - variância da determinação do NR acima do nível zero da régua. Este valor é obtido a partir dos resíduos das componentes harmônicas empregadas no cálculo de Z_0 . Estes resíduos tendem a ser menores em função do aumento da série temporal de observação utilizada na análise harmônica. O ideal para uma boa estimativa da precisão do NR é uma análise de sua variação temporal em longos períodos, já que

a análise harmônica baseada em séries de um ano de observação pode estar eivada de efeitos meteorológicos residuais de caráter anual.

σ_{DRP}^2 - erros de arredondamento do DRP (Diagrama de Redução de Sondagens).

$\sigma_{co-tidal}^2$ - variância dos erros cotidais, gerados pelas diferenças entre as marés na área de trabalho e aquela observada na estação maregráfica na costa. Os erros cotidais são minimizados com a divisão da área em subáreas de redução. Porém, estes erros podem exceder 0,20 m, caso a maré possua características muito complexas, ou haja a presença de efeitos meteorológicos muito intensos na área (MILLS e GILL, 2005, p.275).

2.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO NAVSTAR-GPS

O NAVSTAR (*Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System*) é um sistema de radionavegação baseado no processo de trilateração celeste a partir de satélites artificiais, fornecendo posições tridimensionais precisas, navegação e informações de tempo, em um sistema de referência global, sob quaisquer condições meteorológicas e em qualquer ponto da Terra, durante 24 horas por dia.

Desenvolvido pelo DoD (Departamento de Defesa dos Estados Unidos), a partir dos projetos “Timation” da Marinha americana e “621-B”, da Força Aérea Americana (ANDRADE e GEMAEL, 2004), com o propósito inicial de atender às necessidades militares e de segurança nacional. Sendo assim o primeiro satélite foi lançado em 22 de fevereiro de 1978, tendo o seu primeiro emprego em levantamentos ocorrido em 1982, através do receptor Macrômetro, desenvolvido por C.C. Counselman do M.I.T. (LEICK, 2004). O sistema foi declarado como totalmente operacional em julho de 1995, e conta atualmente com 31 satélites dos blocos II, IIA, IIR e IIR-M, distribuídos em 6 planos orbitais, igualmente espaçados, com aproximadamente 55° de inclinação, a uma altitude média de 20.200 km (<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt>, acesso em 25 de janeiro de 2007).

O princípio fundamental do posicionamento está baseado na medida das pseudodistâncias entre pelo menos quatro satélites e um receptor. A correta detecção dos sinais transmitidos depende do sincronismo entre os relógios dos receptores e dos satélites. Em função disto são necessárias quatro observações

para determinar além das coordenadas tridimensionais, o erro do relógio do receptor.

2.3.1 Sinais dos satélites GPS

Os satélites GPS constituem o Segmento Espacial. Todos os sinais são gerados a partir da frequência fundamental (f_0) de 10,23 MHz, mantida e controlada por relógios atômicos de Césio ou Rubídio com uma precisão 10^{-13} , e futuramente, a partir do Bloco III, relógios atômicos de maser de hidrogênio, com precisão de 10^{-15} em um dia (HOFMANN- WELLENHOF et al., 2001). A interface entre o Segmento Espacial e o Segmento do Usuário é realizada através de duas portadoras da banda L (L1 e L2), moduladas digitalmente, através do método BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) por códigos pseudoaleatórios (PRN - *Pseudo-Random Noise*), utilizados para identificação de cada satélite. A modulação BPSK permite a transmissão de um sinal digital através de uma onda portadora, deslocando a fase para 0° ou 180° desta onda portadora.

Os códigos pseudoaleatórios (PRN), sinais digitais formados por uma seqüência de 0 ou 1, denominados *chips*, transmitidos através das portadoras são:

- Código P para o satélite i , $P^i(t)$, é transmitido na frequência de 10,23 MHz, modulado sobre as portadoras L1 e L2, possuindo um comprimento de 7 dias, ou seja, cada *chip* tem uma duração de 1,5 segundo. O código é formado por uma soma Módulo-2¹³ de duas subseqüências $X1$ e $X2_i$ (ICD-GPS-200C, 2003, p.7). Quando o modo de operação Anti-Spoofing está ativado o código P é criptografado por um código w , gerando o código Y, ou P(Y). Somente usuários autorizados pelo DoD podem ter acesso ao dispositivo AOC (*Auxiliary Output Chips*), para decodificação do código Y.
- Código C/A (*Coarse Aquisition*) é um código *Gold* $G^i(t)$, gerado pela soma Módulo-2 das subseqüências $G1$ e $G2^i$, transmitido na frequência de 1,023 MHz, com uma duração de 1 milissegundo, modulado sobre a portadora L1 (ICD-GPS-200C, 2003, p.7).

¹³ Referente a operações com números binários

A mensagem de navegação $D(t)$ é modulada em ambas as portadoras, a uma taxa de 50 bps. Transmite informações sobre as efemérides dos satélites, parâmetros para correção dos erros dos relógios dos satélites, correlação do tempo GPS e UTC etc. Para os satélites do Bloco IIR-M a mensagem de navegação pode ser modulada com uma taxa de 25 bps (ICD-GPS-200C, 2003, p.10).

Os sinais para as portadoras L1 (S_1^i) e L2 (S_2^i), para um satélite i , serão, de acordo com LEICK (2004):

$$\begin{aligned} S_1^i(t) &= A_p.P^i(t).D(t).\cos(2.\pi.f_1.t) + A_c.G^i(t).D(t).\sin(2.\pi.f_1.t) \\ S_2^i(t) &= B_p.P^i(t).D(t).\cos(2.\pi.f_2.t) \end{aligned} \quad (2.48)$$

onde:

A_p, A_c, B_p - amplitudes dos códigos P(Y) e C/A;

Os novos satélites dos Blocos IIR-M e IIF, e demais blocos subseqüentes, transmitirão os códigos L2-CM (*Civil-Moderate*) e L2-CL (*Civil-Long*), modulados sobre a portadora L2, a uma frequência de 511,5 KHz e possuem duração de 20 milissegundos e 1,5 segundos, respectivamente.

São também transmitidos sinais não padronizados C/A (NSC), Y (NSY), L2-CM (NSCM) e L2-CL (NSCL) para proteger os usuários do uso incorretos dos códigos C/A e Y em caso de funcionamento incorreto do sistema de geração da frequência de referência (IS-GPS-200D, 2004, p.5).

A partir do Bloco IIF será introduzida uma nova portadora, denominada L5, que conterà os códigos I5 e Q5, ambos transmitidos com uma frequência de 10,23 MHz e duração de 1 milissegundo. A mensagem de navegação é adicionada apenas ao código I5 (ICD-GPS-705, 2002, p.6).

A disponibilização de um sinal civil na portadora L2 permitirá a aplicação de algoritmos de correlação mais eficientes, gerando menos ruído e reduzindo os tempos de fixação das ambigüidades inteiras. Com a terceira frequência é possível a realização de combinações lineares capazes de reduzir os efeitos de multicaminho e ruído, melhor do que é atualmente possível com duas frequências (RICHERT e EL-SHEIMY, 2006). Segundo LAU e CROSS (2003), a inclusão da terceira frequência

melhoraria de 40 a 60% a acurácia de sistemas de posicionamento baseados em observações da fase da portadora.

2.3.2 Observações GPS

As principais grandezas observadas em GPS são as fases do código (C/A ou P) e as fases das portadoras, a partir das quais derivam vários algoritmos (ANDRADE e GEMAEL, 2004).

As observações de fase do código são denominadas de Pseudodistâncias (PR) e correspondem ao tempo de propagação do sinal (τ) entre a antena do satélite e a antena do receptor multiplicado pela velocidade de propagação da luz no vácuo (c). O tempo de propagação é obtido pela diferença entre o instante de recepção do sinal (t), na escala de tempo do receptor, e o instante de transmissão do sinal (T), na escala de tempo do satélite.

$$PR = c(t - T) = c\tau \quad (2.49)$$

Entretanto são necessárias correções, dt_u e dt_s , para que os instantes de recepção e transmissão, respectivamente, estejam sincronizados com a escala de tempo atômico GPS (t^{GPS}). Estas correções são devidas a imperfeições dos relógios, sobretudo dos receptores, que utilizam osciladores de quartzo, a fim de reduzir os custos do equipamento. A velocidade de propagação da luz também sofre alterações ao cruzar as diversas camadas da atmosfera até chegar ao receptor. As mais significativas são devidas às refrações ionosférica (d_{ion}) e troposférica (d_{trop}). A equação da Pseudodistância entre um receptor R e o satélite S é dada por (LEICK, 2004):

$$PR_R^S = \rho_R^S - c.dt_R + c.dt_S + d_{ion} + d_{trop} + d_R^{hard} + d_{hard}^S + d_{mult} + \varepsilon_S \quad (2.50)$$

onde:

ρ_R^S - é a distância geométrica entre o receptor R e o satélite S , dada por:

$$\rho_R^S = \tau.c = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2} \quad (2.51)$$

X^S, Y^S, Z^S - coordenadas do satélite S;

X_R, Y_R, Z_R - coordenadas do receptor R;

dt_R^{hard} - atraso de hardware no receptor;

dt_{hard}^S - atraso de hardware no satélite;

d_{mult} - erro devido ao efeito de multicaminho do sinal;

dt_R - estado do relógio do receptor em relação ao tempo GPS (t_R^{GPS});

dt^S - estado do relógio do satélite em relação ao tempo GPS (t_S^{GPS});

c - velocidade da luz no vácuo;

ε_S - ruído presente na medida da pseudodistância. Este ruído será menor para o código P(Y).

As pseudodistâncias obtidas a partir da fase da portadora (Φ_R^S) possuem uma precisão da ordem de 1% do comprimento de onda, ou seja, aproximadamente 2 mm. A frequência da portadora recebida varia em função do efeito Doppler induzido pelo movimento relativo entre o satélite e o receptor. O receptor mede a fase da frequência de batimento, isto é, a diferença entre as fases da réplica da portadora gerada no receptor e da portadora transmitida pelo satélite.

$$\varphi_R^S(t_R) = \varphi_R(t_R) - \varphi^S(t_R) + N_R^S \quad (2.52)$$

onde:

t_R - instante de recepção do sinal no relógio do receptor;

$\varphi_R^S(t_R)$ - medida da fase da portadora (frequência de batimento) no instante t_R , contada a partir de um instante inicial t_0 ;

$\varphi_R(t_R)$ - fase da réplica do sinal gerado no receptor;

$\varphi^S(t_R)$ - fase do sinal transmitido pelo satélite; e

N_R^S - número de ciclos inteiros de comprimentos de onda existente entre o receptor e o satélite no instante inicial t_0 .

A unidade de $\varphi_R^S(t_R)$ é dada em número de ciclos.

Os receptores GPS são capazes de medir apenas a fase de batimento, correspondente a uma fração de ciclo (entre 1 e -1). A distância total entre o satélite e o receptor é obtida somando-se a parte fracionária medida mais o número de ciclos inteiros entre o receptor e o satélite. Este valor é denominado ambigüidade inteira, e é uma incógnita que deve ser resolvida dentro do processo de ajustamento, para obtenção das pseudodistâncias. A equação geral da fase da portadora em unidades de ciclos, incluindo os erros sistemáticos, é dada por:

$$\varphi_R^S(t_R) = \frac{f}{c} \rho_R^S + f \cdot dt_R - f \cdot dt^S + \frac{f}{c} (d_{trop} - d_{ion} + d_{mult} + d_R^{hard} + d_{hard}^S) - N_R^S \quad (2.53)$$

onde:

f - frequência da portadora;

Multiplicando-se ambos os lados da equação (2.53) pelo comprimento de onda da portadora (λ), tem-se o valor da fase da portadora, em unidades de comprimento (Φ_R^S). Para efeito de simplificação os erros devido ao multicaminho (d_{mult}) e atrasos dos *hardwares* no receptor e no satélite (dt_R^{hard} e dt_{hard}^S) são considerados implícitos no resíduo (ε), que contém também o ruído da recepção da fase da portadora. Tem-se então:

$$\Phi_R^S = \rho_R^S + c \cdot dt_R - c \cdot dt^S + d_{trop} - d_{ion} - \lambda \cdot N_R^S + \varepsilon \quad (2.54)$$

onde:

$$\Phi_R^S = \lambda \cdot \varphi_R^S$$

A correção ionosférica para observação de fase da portadora possui sinal contrário ao da observação da fase do código, devido às diferenças de velocidade entre a modulação código e a onda portadora durante a propagação do sinal na ionosfera.

2.3.3 Principais erros associados ao GPS

Alguns erros no sistema GPS já foram apresentados como parcelas das expressões 2.50 e 2.52. Estes erros estarão associados aos satélites, ao meio de propagação e ao receptor (LEICK,2004). MONICO (2000) cita ainda erros associados à própria estação, tais como erros nas coordenadas, multicaminho, marés terrestres, movimento do pólo, carga dos oceanos e pressão atmosférica. O efeito combinado das incertezas nas efemérides, erros na propagação do sinal, erros dos relógios e ruídos do receptor projetados sobre uma linha entre o satélite e o observador é chamado UERE (*User Equivalent Range Error*).

2.3.3.1 Erros associados aos Satélites

A precisão das coordenadas dos satélites depende da qualidade das efemérides utilizadas no seu cálculo, que poderão ser transmitidas ou pós-processadas, fornecidas pela Internet por alguns centros de controle. De acordo com as equações da pseudodistância e da fase, a precisão da distância geométrica entre o satélite e o observador (ρ_R^S) será refletida diretamente nas coordenadas do receptor. Métodos diferenciais de observação eliminam quase totalmente os erros das órbitas, porém permanecem alguns resíduos que dependerão do tamanho da linha de base. Pode ser determinada uma aproximação do erro (db) sobre uma linha de base (b), em função do erro da órbita (dr), para um satélite a uma distância ρ do observador através da expressão dada por SEEGER (2003):

$$db = b \cdot \frac{dr}{\rho} \quad (2.55)$$

Sendo assim uma precisão de 1 cm sobre uma linha de base de 10 km, implicaria em um erro na órbita menor que 25 metros, o que é possível de ser obtido através das próprias efemérides transmitidas.

Os relógios dos satélites constituem uma outra fonte de erro associada aos satélites. Como as pseudodistâncias são determinadas em função do intervalo de

tempo entre a transmissão e a recepção do sinal, é necessário que os relógios estejam corretamente sincronizados com o tempo GPS. Assim, uma diferença de $1\mu s$ produzirá um erro de 300 metros na pseudodistância. O erro de sincronismo dos relógios dos satélites para um instante t em relação ao tempo GPS é dado pela expressão:

$$dt^s(t) = af_0 + af_1 \cdot (t - t_{oc}) + af_2 \cdot (t - t_{oc})^2 \quad (2.56)$$

onde:

af_0, af_1, af_2 - correspondem respectivamente ao estado, marcha e variação da marcha do relógio do satélite. Estes coeficientes são dados pelas efemérides; e t_{oc} - corresponde ao tempo origem do relógio.

Existe ainda o efeito “phase Wind-up” em função do ângulo yaw do satélite. Como o satélite busca orientar-se em direção ao sol a fim de maximizar a energia solar coletada por seus painéis solares, é executada uma rotação em torno do seu eixo vertical (yaw). Considerando que os sinais GPS possuem uma polarização horizontal à direita, esta rotação do satélite introduz uma alteração na fase observada no receptor. Contudo este efeito pode ser negligenciado para aplicações em bases curtas (LEICK, 2004, p. 233).

2.3.3.2 Erros associados à propagação do sinal

Correspondem aos efeitos sofridos pelo sinal durante seu trânsito, através de um meio não homogêneo, entre o satélite e o receptor. Neste percurso o sinal poderá sofrer refrações atmosféricas, reflexões (multicaminho) ou encontrar obstruções (perdas de ciclos). As refrações atmosféricas mais significativas são aquelas devido às camadas ionosférica e a troposférica.

A Ionosfera corresponde a uma camada composta de partículas ionizadas (íons), cujo volume é modelado e quantificado pela unidade TEC (*Total Eletron Content*), que alteram o índice de refração do meio, e conseqüentemente, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, gerando pseudodistâncias maiores obtidas pelo código, e menores, quando medidas pela fase da portadora. Como o efeito da refração ionosférica pode ser modelado e depende da frequência

do sinal, o uso de receptores de dupla frequência pode eliminar até 92% do erro provocado pela refração ionosférica em posicionamento absoluto (ANDRADE e GEMAEL, 2004, p. 295).

A refração troposférica é responsável por aproximadamente 20% dos erros associados à propagação do sinal (WERT,2004, p.11). Pode ser dividida em uma componente úmida e outra seca. A componente seca é devida à presença de gases como N_2 e O_2 na atmosfera baixa, e é responsável por 90% da refração troposférica. Como a presença destes gases apresenta um caráter sistemático, os erros advindos desta componente podem ser eliminados, porém a componente úmida, devida a presença de vapor d'água, depende das condições climáticas, as quais podem alterar-se rapidamente. O uso de modelos troposféricos, juntamente com o acompanhamento de informações de pressão, temperatura e umidade relativa pode aprimorar os resultados no posicionamento.

As perdas de ciclos são percebidas através da variação da fase observada no receptor por um degrau correspondente a um número inteiro de ciclos. Isto ocorre devido a perda de sintonia do sinal do satélite, normalmente provocada por algum tipo de obstrução. A parte fracionária da fase, medida no receptor, não é afetada. Alguns algoritmos são capazes de detectar a perda de ciclos, tais como a Tripla-Diferença de Fase (TDF) e a solução Geometria-Livre (LEICK,2004).

Durante sua propagação o sinal pode sofrer reflexões antes de atingir a antena do receptor, aumentando assim o tempo de transmissão do sinal, e conseqüentemente o valor da pseudodistância medida e da fase observada. A este erro dá-se o nome de multicaminho, e pode ser provocado por estruturas próximas à antena do receptor. A redução deste efeito no posicionamento diferencial preciso é fundamental, já que a fase observada é alterada, o que poderá provocar erros que variam do decímetro ao metro (SEEBER,2003). Os erros nas estações de referência são propagados ao receptor móvel. Assim devem ser escolhidos locais abertos e preferencialmente antenas que evitam reflexões do solo, tais como antenas tipo *choke ring* ou com *ground plane*. Segundo MONICO (2000,p.147), apesar do caráter aleatório dos efeitos de multicaminho, os arquivos *.mp1 e *.mp2, fornecidas pelo programa TEQC (*Translation Edition and Quality Control*), fornecem uma idéia quantitativa dos efeitos de multicaminho, porém dependem de observações de dupla frequência.

2.3.3.3 Erros associados ao receptor

Assim como nos satélites, os relógios dos receptores não estão sincronizados com o tempo GPS. O erro dos relógios dos receptores (dt_R) é calculado juntamente com as coordenadas do próprio receptor durante o processo de ajustamento. O posicionamento relativo pode eliminar estes erros, desde que haja simultaneidade nas observações.

O ponto de referência para o posicionamento do receptor é o centro de fase da antena, e geralmente não coincide com seu centro geométrico, e sua posição varia de acordo com a elevação, o azimuth, intensidade e frequência do sinal do satélite recebido. Como sua posição não pode ser mensurada fisicamente, utiliza-se outro ponto externo de referência da antena (ARP - *antenna reference point*), cujo relacionamento com o centro de fase é dado pelo offset de fase (PCO - *Phase Center Offset*), assim como pela sua variação PCV (*Phase Center Variation*). Estes valores de PO e PCV são determinados por operações de calibração da antena. Para levantamentos cinemáticos em bases curtas, estes erros provenientes da variação do centro de fase da antena podem ser eliminados, desde que o receptor móvel e a estação de referência estejam utilizando o mesmo tipo de antena (LEICK, 2004). Maiores detalhes podem ser vistos em FREIBERGER JUNIOR et al. (2005).

2.3.3.4 Erros associados à Estação

São decorrentes de fenômenos geofísicos que afetam as coordenadas dos pontos envolvidos no levantamento. As marés terrestres ou sólidas, geradas pelas interações gravitacionais entre a Terra, a Lua e o Sol, provocam deformações na crosta. Apesar das marés oceânicas e terrestres serem consequência da mesma interação gravitacional e terem as mesmas componentes, suas fases e distribuição espacial têm uma forma totalmente diversa (FREITAS, 1993, p.45). Os deslocamentos de massa líquida, decorrentes das marés oceânicas, provocam uma flexão do fundo oceânico costeiro, e uma consequente alteração na crosta. Há ainda o efeito provocado pela carga atmosférica, ou seja, deslocamentos da superfície

devido a alterações da pressão atmosférica, notadamente nas altas latitudes em função das maiores variações meteorológicas.

Normalmente a técnica RTK não necessita de correções devida às marés terrestres, já que a distância entre a estação de referência e o receptor móvel é pequena, e os deslocamentos da crosta podem ser considerados os mesmos, anulando-se através do processo de diferenciação (NORDEN et al.,2005).

2.3.4 Combinações Lineares das Observações

A combinação linear entre as observações de fase e código, de ambas as frequências, permitem o estabelecimento de modelos matemáticos que facilitam o processamento GPS, permitindo a determinação de parâmetros incógnitos, ou atenuação dos erros sistemáticos. Porém a combinação linear pode aumentar o ruído na observável resultante. As combinações lineares (Tabela 8) podem ser, segundo SEEGER (2003):

- entre observações de diferentes estações;
- entre observações de diferentes satélites;
- entre observações de diferentes épocas;
- entre observações do mesmo tipo; e
- entre observações de diferentes tipos.

TABELA 8 – PRINCIPAIS COMBINAÇÕES LINEARES DE OBSERVAÇÕES DA FASE DA PORTADORA

Observável	n	M	$\lambda_{n,m}$ (cm)	$Ruído_{n,m}$ (mm)	Vantagem	Desvantagem
L_1	1	0	19,0	3,0		
L_2	0	1	24,0	3,9		
L_N	1	1	10,7	2,1	Baixo Ruído	Resolução das Ambigüidades
L_W	1	-1	86,2	19,4	Resolução das Ambigüidades	Ruído elevado
L_3	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$	$\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$	5,4	10,0	Livre dos Efeitos da Ionosfera	Ruído elevado

FONTE: Adaptado de SEEGER (2003) e PRADO(2001)

A combinação linear entre as fases das portadoras (L_1 e L_2) tem como principais objetivos a eliminação dos efeitos da ionosfera e/ou a resolução das ambigüidades inteiras. A combinação linear L_3 , denominada livre da ionosfera é

muito utilizada em posicionamento geodésico de precisão em bases longas. Já a observável L_W , denominada banda larga (*wide lane*), facilita a solução das ambigüidades inteiras devido ao seu maior comprimento de onda, também utilizada em bases longas.

O posicionamento relativo ou diferencial utiliza combinações entre observações de diferentes estações, satélites e em épocas distintas. Considerando apenas as equações de fase da portadora pode-se ter: a Simples Diferença de Fase (SDF), a Dupla Diferença de Fase (DDF) e a Tripla Diferença de Fase (TDF).

A Simples Diferença de Fase (SDF) é formada pelas combinações entre satélites e estações. A forma mais usual é a diferença calculada entre dois receptores (A e B) que rastreiam o mesmo satélite (i) em um instante (t_1). Para bases curtas, os erros da órbita do satélite e de refração atmosférica são minimizados, pois podem ser considerados similares em ambas as estações. O modelo matemático obtido é dado pela diferença entre as fases observadas, de acordo com a expressão:

$$\Delta\Phi_{AB}^i = \rho_{AB}^i + cdt_{AB} - \lambda \cdot N_{AB}^i - \varepsilon_{AB} \quad (2.57)$$

Percebe-se do modelo matemático da SDF que o erro do relógio do satélite é eliminado, assim como os erros atmosféricos, para linhas de bases curtas.

A Dupla Diferença de Fase (DDF) é gerada pela subtração de duas SDF, envolvendo dois receptores (A e B) e dois satélites (i e j) em um instante (t_1), de acordo com o modelo matemático:

$$\nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij} = \Delta\Phi_{AB}^j - \Delta\Phi_{AB}^i \quad (2.58)$$

Substituindo pelo valor da (2.57) tem-se:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij} &= (\rho_{AB}^j + cdt_{AB} - \lambda \cdot N_{AB}^j - \varepsilon_{AB}) - (\rho_{AB}^i + cdt_{AB} - \lambda \cdot N_{AB}^i - \varepsilon_{AB}) \\ \nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij} &= \rho_{AB}^{ij} - \lambda \cdot N_{AB}^{ij} - \varepsilon_{AB}^{DDF} \end{aligned} \quad (2.59)$$

Os erros dos relógios dos receptores são eliminados. As incógnitas do modelo são as coordenadas da estação desconhecida e as ambigüidades. A equação da

DDF é normalmente a observável mais utilizada em processamentos GPS em função da melhor relação sinal / ruído resultante e a eliminação de erros sistemáticos (ANDRADE E GEMAEL, 2004 e MONICO, 2000).

A Tripla Diferença de Fase (TDF) consiste na diferença entre duas DDF, envolvendo os mesmos receptores, A e B, e os mesmos satélites, i e j , em épocas distintas. Considerando duas DDF nas épocas t_1 e t_2 , tem-se que o modelo da TDF é expresso por:

$$\delta \nabla \Delta \Phi_{AB}^{ij} = \nabla \Delta \Phi_{AB}^{ij}(t_2) - \nabla \Delta \Phi_{AB}^{ij}(t_1) = (\rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1)) \quad (2.60)$$

O algoritmo da TDF elimina a dupla diferença de ambigüidade da fase da portadora. Esta combinação não fornece resultados com boa precisão devido à alta correlação entre as observações, porém é bastante útil na detecção de erros grosseiros, como os ocorridos na presença de perdas de ciclos.

2.4 MÉTODOS DE POSICIONAMENTO

Os métodos de posicionamento GNSS podem ser divididos em três grupos: Absoluto, Relativo e Diferencial.

No método absoluto ou posicionamento por ponto, a posição é vinculada ao sistema de referência associado ao GPS, WGS-84 atualização G1150, e calculada, através de efemérides transmitidas, com observação da fase do código de no mínimo quatro satélites. É disponibilizado por dois tipos de serviço, de acordo com a precisão fornecida: SPS (*Standard Positioning System*), com observação do código C/A, e PPS (*Precise Positioning System*), a partir do código P. Com a desativação da SA (Selective Availability) a performance de ambos os serviços é praticamente idêntica (SEEBER, 2003).

Os métodos de posicionamento relativo empregam técnicas diferenciais de observação (seção 2.3.4) a fim de minimizar os erros correlacionados, tais como erro das órbitas dos satélites e erros atmosféricos. Isto permite calcular com precisão o vetor entre uma estação base, de coordenadas conhecidas e referenciadas ao sistema WGS-84 G1150, e outra desconhecida. Normalmente o posicionamento relativo estático utiliza observações de fase da portadora visando uma maior precisão requerida por levantamentos geodésicos e geodinâmicos.

O princípio básico do método diferencial consiste no posicionamento em tempo real de uma estação móvel através das correções diferenciais geradas na estação de referência (KRUEGER, 1996). As correções diferenciais podem ser geradas a partir de observação da fase do código, da portadora, ou código suavizado pela portadora. Na prática tem-se empregado o termo DGPS para o posicionamento diferencial em tempo real empregando-se correções de posição ou pseudodistância a partir de observações do código e código suavizado pela onda portadora, e o termo RTK, quando o posicionamento diferencial é obtido a partir de medidas brutas de fase da onda portadora ou correções diferenciais de fase da portadora. As técnicas diferenciais baseadas na observação da fase da portadora são capazes de alcançar elevada acurácia de posicionamento em função da maior precisão obtida através das observáveis de fase da portadora. A validação destas correções diferenciais torna-se menos efetiva a medida que aumenta a distância entre as estações móvel e de referência, degradando progressivamente a qualidade do posicionamento (BRIONES, 1999).

Para minimizar as perdas de qualidade do posicionamento diferencial em função da distância, desenvolveu-se o conceito das redes de estações de referência, sob duas abordagens distintas: no domínio das medidas e a representação espaço de estado¹⁴ (HOFMANN-WELLENHOF, 2003, p.201). A primeira abordagem baseia-se na transmissão e aplicação de correções diferenciais escalares (PRCs e RRCs) na estação móvel, a partir de uma estação referência mais próxima, ou de uma média das correções de um conjunto de estações, empregando o conceito de estação de referência virtual (VRS - *Virtual Reference Station*) e correções FKP, ou o conceito *Master-Auxiliary* (MAC - *Master Auxiliary Concept*), que constitui a base das mensagens dos padrões RTCM 3.0 (2004) e 3.1 (2006), que serão abordadas na seção 2.4.1.2. Este tipo de abordagem exige uma alta densidade de estações de referência, e é adotada nos serviços PDGPS (*precise DGPS*).

A abordagem espaço de estado compreende uma rede global de estações de referência, empregando receptores de dupla frequência utilizados para gerar soluções livres dos efeitos ionosféricos para cálculo de correções das órbitas dos satélites e erros dos relógios. As correções orbitais são transmitidas como vetores

¹⁴ Modelo matemático de um sistema físico dado por um conjunto de informações de entrada, saída e variáveis de estado correlacionadas através de equações diferenciais de primeira ordem. Provê uma maneira compacta de modelar e analisar sistemas com múltiplas variáveis de entrada e saída (Wikipedia, acesso em 28/12/2006).

tridimensionais que correlacionam a posição verdadeira do satélite aos parâmetros orbitais presentes nas efemérides transmitidas. As correções ionosféricas são modeladas, normalmente, a partir das mensagens TEC (*total electron content*), em função da hora local, latitude, ciclo de atividades solar e outros fatores (HOFMANN-WELLENHOF, 2003, p.201). São empregados ainda modelos troposféricos. Todas as informações de correções são interpoladas para a posição do usuário e transmitidas através de satélites geoestacionários. Esta abordagem requer uma densidade menor de estações de referência e possibilita alcances muito maiores, sendo denominadas WADGPS (*Wide Área DGPS*).

O WADGPS pode ser implementado através de sistemas regionais ampliados, denominados SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), onde além das correções diferenciais, sinais para aumento da confiabilidade e integridade da rede são transmitidos via satélite para as estações móveis (LEICK,2004). Alguns SBAS foram e estão sendo implementados nos Estados Unidos (WAAS - *Wide Area Augmentation System*) , Europa (EGNOS - *European Geostationary Navigation Overlay Service*), Japão (MSAS - *MTSAT Satellite-Based Augmentation System*), Canadá (CWAAS - *Wide Area Augmentation System*), Índia (GAGAN - *GPS And GEO Augmentation Navigation*), Austrália (GRAS - *Ground Regional Augmentation System*) e China (SNAS - *Satellite Navigation Augmentation System*). Há ainda outros sistemas WADGPS, disponibilizados por provedores comerciais, entre eles pode-se citar: OmniSTAR, StarFix-Plus e StarFix-HP (Fugro Chance,Inc.), SkyFix XP (Thales Geosolutions Group Ltd.) e C-Nav/StarFire (C&C Technologies,Inc.). Este último emprega a técnica RTG (Real Time GIPSY), que será abordada na seção 2.4.3.

OmniSTAR

Sistema proprietário operado pela Fugro Chance,Inc. Provê correções diferenciais de pseudodistâncias, através de uma rede de 70 estações de referência e 3 centros de controle. Associadas às correções diferenciais, o usuário deve aplicar correções atmosféricas baseadas na sua posição aproximada, através da técnica VBS (*Virtual Base Station*). Além do serviço diferencial VBS, existem os serviços XP e HP, com precisões horizontais de 10 e 20 cm, respectivamente (www.omnistar.com, acessado em 16/05/06). As correções diferenciais para a

América do Sul são transmitidas pelo satélite AM-Sat. A unidade OmniSTAR opera em conjunto com um receptor GPS de uma frequência e estão integrados em um único equipamento e uma única antena.

StarFix-Plus

Sistema comercial também da *Fugro Chance Inc.*, diferindo do OmniSTAR apenas por empregar receptores de dupla frequência nas estações de referência, o que permite uma melhor modelagem das correções ionosféricas.

Starfix HP

A empresa *Fugro Chance Inc.* desenvolveu um algoritmo proprietário para solução de ambigüidades em linhas de base múltiplas, que reduz os efeitos dos erros dependentes da distância através de correções produzidas por estações de referência virtuais e otimizadas em função da localização do usuário (LAPUCHA et al.,2001). Os efeitos ionosféricos são reduzidos através do processamento das portadoras L1 e L2. Não há informações na literatura sobre como são efetuadas as correções troposféricas.

SkyFix XP

Uma rede global de estações de referência operada pela empresa Thales provê observações GPS para cálculo das correções, que são baseadas no mesmo princípio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Da mesma forma que os serviços anteriores, a correção ionosférica é possível através do processamento de dupla frequência, e os atrasos troposféricos são corrigidos por pelo menos um modelo de predição, porém não existe literatura sobre este tema.

Existe atualmente o Posicionamento de Ponto Preciso (PPP), estático ou em tempo real, com precisões decimétricas obtidas através de correções consistentes (KOUBA,2001) para as órbitas e erros dos relógios dos satélites, modelos troposféricos, combinações lineares livres do efeito ionosférico, erros do centro de

fase da antena, além de correções das marés terrestres e carga dos oceanos (para posicionamentos mais precisos). As correções das órbitas e dos erros dos satélites são geradas pelo processamento de observações de código, fase, relações sinal-ruído, e posições de uma rede de aproximadamente 50 estações pertencentes à rede GPS global da NASA. O processamento é executado pelo programa Real-Time GIPSY (RTG), que disponibiliza as correções por Internet ou via Banda-L do satélite INMARSAT, com latência de alguns segundos (LEICK, 2004).

2.4.1 Técnica *Real Time Kinematic* (RTK)

Técnica desenvolvida no início dos anos 90 como uma alternativa para melhorar a precisão do método diferencial baseado em observações do código ou código suavizado pela onda portadora (DGPS). A técnica RTK poderá usar correções diferenciais de fase ou observações brutas, geradas e transmitidas por uma estação de referência. Segundo HOFMANN- WELLENHOF et al. (2001, p.135), dependendo dos dados transmitidos pela estação de referência a técnica RTK será classificada como posicionamento diferencial ou relativo. As correções diferenciais de fase (CPC_R^S), geradas a partir de observações de pseudodistância e fase da portadora em uma estação de referência (R), com coordenadas conhecidas, são dadas pela expressão (SEEBER, 2003):

$$CPC_R^S = \Phi_R^S - \text{Frac}\left(\frac{\rho_R^S}{\lambda \cdot N_R}\right) \quad (2.61)$$

onde:

Φ_R^S - fase observada na estação de referência, em unidades de comprimento;

ρ_R^S - distância geométrica entre a estação de referência (R) e o satélite (S);

λ - comprimento de onda da portadora; e

N_R - ambigüidade inteira resolvida na estação de referência, sendo:

$$N_R = \text{Int}\left(\frac{\rho_R^S}{\lambda}\right) \quad (2.62)$$

Além das correções diferenciais de fase podem ser transmitidas as observações de pseudodistância e de fase da onda portadora, tomadas a partir da estação de referência. Os dados são transmitidos em formato apropriado, estabelecido pela RTCM SC-104 (*Radio Technical Commission for Maritime Services – Special Committee 104*). As correções diferenciais são aplicadas diretamente na fase observada em um receptor móvel, e as observações de pseudodistâncias e fases utilizadas em algoritmos de dupla diferença de fase (DDF) (seção 2.3.4), possibilitando uma navegação com precisão centimétrica em tempo real.

Estas precisões somente são possíveis com a solução das ambigüidades inteiras no receptor móvel, durante o seu movimento. Esta solução é obtida com o emprego das técnicas conhecidas como “*on-the-fly*” (OTF) ou “*on-the-way*” (OTW). O tempo de fixação das ambigüidades (TTFA - *time to fix ambiguities*) dependerá do comportamento dos erros dependentes da distância, podendo ser igual a apenas uma época, para curtas distâncias e sob condições favoráveis. Sendo assim, o TTFA constitui um dos fatores limitantes do alcance da técnica RTK a valores máximos de até 10 km (SEEBER, 2003). Outras limitações de alcance são determinadas pelo meio de comunicação empregado e as chamadas perdas de espaço livre, quando utilizados sinais de rádio para transmissão dos dados. O alcance pode ser aumentado com o uso de redes de Estações de Referência (PDGPS).

As medidas de fase da portadora são altamente sensíveis a perdas de ciclos. É preciso que a estação móvel disponha de softwares adequados para rápida detecção e correção destas falhas de sinal, que estão diretamente associadas à solução das ambigüidades enquanto em movimento, através da técnica OTF. O uso do algoritmo de triplas diferenças de fase (TDF) e o uso de modelos de solução que empregam geometria-livre (LEICK, 2004) podem ser utilizados para detecção das perdas de ciclos.

Para bases curtas (até 10 km) a estação de referência e o receptor móvel podem rastrear simultaneamente a mesma constelação de satélites, gerando certa correlação entre os erros em ambas as estações, pois além da eliminação dos erros dos relógios, os efeitos atmosféricos e os erros nas órbitas são considerados semelhantes nas estações, tornando efetivas no receptor móvel as correções

geradas na estação de referência. Ambas as estações devem rastrear pelo menos cinco satélites, para se ter uma boa solução das ambigüidades.

O uso das correções diferenciais (mensagens RTCM 20/21) possibilita uma diminuição dos erros devidos à latência, em função: das correções diferenciais possuírem uma variação temporal menor que as observações brutas (mensagens RTCM 18/19); da simplificação dos cálculos na estação móvel; e de um menor volume de dados para transmissão, o que permite usar larguras de banda menores. Porém a estação móvel depende da confiabilidade das correções geradas na estação de referência (RTCM, 2001). Além disto quando são utilizadas observações brutas de fase e pseudodistância, geralmente são usados os mesmos algoritmos nas estações de referência e móvel, cancelando os erros correlacionados pela diferenciação. A aplicação das correções diferenciais poderá redundar em erro, já que estas podem não ter sido obtidas pelo mesmo algoritmo empregado no receptor móvel (RTCM, 2001).

Segundo PRADO (2001), o uso das observações brutas de pseudodistância e de fase da onda portadora permitem uma modelagem mais adequada ao levantamento, bem como a eliminação dos erros dos relógios dos satélites e dos receptores. Em função disto o par de mensagens 18/19 tem sido mais usado do que as correções providas pelas mensagens 20/21 (LANGLEY, 1998).

2.4.1.1 Solução das Ambigüidades

O posicionamento diferencial de precisão é obtido a partir da fixação inicial das ambigüidades inteiras. Esta operação é chamada de inicialização. A partir deste valor inicial das ambigüidades o receptor móvel tem condições de calcular a pseudodistância a partir da fase da portadora acumulada. Entretanto, se houver alguma perda de sinal, o cálculo da pseudodistância sofrerá uma alteração de um determinado número de ciclos inteiros, sendo necessária uma nova inicialização. Em termos de levantamentos cinemáticos em tempo real no mar, é totalmente inviável a inicialização estática, sendo necessários algoritmos que permitam uma inicialização tão rápida, que o receptor não precise ficar imóvel.

Podem ser adotados quatro tipos de estratégias para o cálculo das ambigüidades:

- a) método geométrico (no domínio das coordenadas);

- b) combinações de observações de fase e código (domínio das observações);
- c) métodos de busca das ambigüidades (domínio das ambigüidades); ou
- d) métodos combinados (SEEBER, 2003).

Os primeiros métodos exigiam inicialização estática, como intercâmbio de antenas, introduzido por REMONDI (1985), e o método de linhas de base conhecidas. Os métodos de busca no espaço das coordenadas, como por exemplo a Função Ambigüidade proposta por COUNSELMAN e GOUREVITCH¹⁵ citados por GARNÉS (2001), são baseados na busca em um espaço no entorno das coordenadas aproximadas de uma estação desconhecida, a partir de injunções de ambigüidades que satisfaçam ao máximo da função. Há ainda métodos de busca no espaço das ambigüidades, cujas ambigüidades são resolvidas sem os artifícios de busca das coordenadas, aceitando como solução, após uma validação estatística, a solução do problema de mínimos quadrados inteiro (GARNÉS, 2001). Dentre estes métodos pode-se citar as soluções baseadas no desvio padrão das ambigüidades, método FARA, desenvolvido por FREI e BEUTLER¹⁶, LAMBDA (*Least Square Ambiguity Decorrelation Adjustment*), inicialmente apresentado por TEUNISSEN¹⁷ (1993). Além destes, é possível realizar uma integração entre os métodos utilizando as combinações lineares com receptores de dupla frequência ou pseudodistâncias suavizadas pela portadora. Outras formas de acelerar a solução das ambigüidades é através de injunções de altitude da antena GPS e de uma ou duas ambigüidades inteiras conhecidas (REMONDI et al., 1992).

O algoritmo responsável pelo cálculo das ambigüidades inteiras pode estar incorporado aos receptores, ou então ser utilizado através de programas especiais em computadores conectados aos receptores, como por exemplo o GNREF/GNRT-K. Esta possibilidade de solução das ambigüidades inteiras em movimento possibilita sua aplicação em navios de levantamentos hidrográficos, uma vez que é impossível manter-se imóvel sua antena, mesmo quando atracado ao cais. Uma vez fixados os valores inteiros das ambigüidades, o receptor móvel poderá dispor de coordenadas em tempo real, sem a necessidade de pós-processamento.

¹⁵ COUNSELMAN, C.C.; GOUREVITCH, S.A. **Miniature interferometer terminals for earth surveying: ambiguity and multipath with the Global Positioning System**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE, v. 19, pp. 244-252, 1981

¹⁶ FREI, E.; BEUTLER, G. **Rapid static positioning base don the fast ambiguity resolution approach "FARA": Theory and first results**. Manuscripta Geodaetica, v.15, nº 6, pp. 325-356, 1990

¹⁷ TEUNISSEN, P.J.G. **The Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation**. Delft Geodetic Computing Centre (LGR), LGR-report nº 9, 18 p., 1994

A empresa *THALES Navigation* desenvolveu a técnica LRK (*Long Range Kinematic*) para resolução das ambigüidades, baseada em observações de dupla frequência, a partir do aperfeiçoamento de sua antiga técnica KART (*Kinematic Applications in Real Time*), desenvolvida nos anos 90 para proporcionar desempenho cinemático OTF a receptores de uma frequência.

As coordenadas de uma estação móvel são obtidas a partir de sucessivas iterações, tomando-se como valor inicial a posição da estação determinada por método não ambíguo, tais como medidas de fase do código ou tripla diferença de fase. Diferentemente de outras técnicas diferenciais com observação de fase, a técnica LRK emprega as partes fracionárias das duplas diferenças das medidas ambíguas de fase $(\nabla\Delta\Phi_{AB}^{ij})_{FRAC}$ e de distância $(\nabla\Delta R_{AB}^{ij})_{FRAC}$ entre os satélites i e j , a posição aproximada do receptor móvel e estação de referência. Desta forma a posição inicial sofre incrementos dados pela expressão (LUTZ e GOUNON, 2001):

$$\Delta\varphi_{AB}^{ij} - \Delta R_{AB}^{ij} = A.\Delta X, \text{ sendo } |\Delta\varphi_{AB}^{ij} - \Delta R_{AB}^{ij}| < \lambda/2 \quad (2.63)$$

onde:

A - matriz *design* das derivadas parciais em relação aos parâmetros desconhecidos;

ΔX - é o incremento de posição; e

λ - comprimento de onda visível resultante da geometria da dupla de satélites empregados nas duplas diferenças.

Como a técnica LRK emprega dupla frequência, o comprimento de onda utilizado é o resultante da combinação linear *Wide Lane*, facilitando a solução da posição inicial da estação móvel, além de permitir uma redução dos efeitos ionosféricos. Como é usada apenas a parte fracionária das observações de fase, o problema de determinação das ambigüidades inteiras é eliminado do processo, que também exige menos esforço computacional em função da independência dos modelos estocásticos para cálculos em torno do volume de busca para solução das ambigüidades. Um maior alcance pode ser obtido com o emprego de um link de comunicação UHF, que pode alcançar algumas dezenas de quilômetros. (LUTZ e GOUNON, 2001).

2.4.1.2 Mensagens padronizadas RTCM

A RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Service*) é uma organização internacional científica, profissional e educacional, sem fins lucrativos (RTCM,2006). Constituída por mais de cem organizações participantes, governamentais ou não, engajadas no desenvolvimento de padrões internacionais para sistemas de radionavegação e radiocomunicação. Composta de Comitês Especiais (SC), responsáveis pela disseminação de relatórios denominados Padrões RTMC Recomendados nas diversas áreas afetas a radionavegação e radiocomunicação. O Comitê Especial 104 (SC-104) é responsável pela disseminação dos padrões para os sistemas diferenciais GNSS, utilizados mundialmente para navegação por satélite, tanto marítima quanto terrestre.

Os padrões são compostos por mensagens numericamente identificadas, de acordo com o tipo de informação transmitida, visando à correção de um determinado erro inerente aos sistemas GNSS. O formato das mensagens segue a mesma estrutura das mensagens de navegação do sistema GPS, com palavras de 30 bits e taxa de transmissão de 50 bps. De acordo com a evolução das técnicas de posicionamento, novas tecnologias e meios de comunicação, eram incorporadas novas mensagens, constituindo as diferentes versões do padrão RTCM SC-104. A Tabela 9 apresenta alguns tipos principais de mensagens RTCM SC-104, pertencentes às versões 2.

A primeira versão (1.0) foi publicada em 1985, sendo substituída em 1990 pela versão 2.0, atendendo ao posicionamento diferencial baseado em observações de fase do código e código suavizado pela fase da onda portadora (DGPS). Em 1994, a versão 2.1 incluiu as mensagens 18, 19, 20 e 21, que possibilitaram o posicionamento RTK. A versão 2.2 (1998) incluiu a possibilidade de transmissão de correções diferenciais de outros GNSS, como GLONASS, por exemplo (SEEBER, 2003; LANGLEY, 1998). Atualmente estão disponíveis as versões 2.3 (2001) e 3.0 (2004), aperfeiçoando a acurácia dos sistemas RTK e das redes de estações de referência, respectivamente. A versão 3.1 (2006), denominada RTCM padrão 10403.1, procura fornecer um padrão de mensagens de correção que atenda serviços DGNSS (DGPS e RTK) *Wide Área*.

TABELA 9 - PRINCIPAIS TIPOS DE MENSAGENS RTCM DAS VERSÕES 2

Mensagem tipo nº	Título
1	Correções Diferenciais GPS
2	Correções Delta Diferenciais GPS
3	Parâmetros da Estação de Referência GPS
4	Datum da Estação de Referência
5	Saúde da constelação GPS
6	Mensagem nula
7	Almanaque dos Radiofaróis DGPS
8	Almanaque das estações pseudolites
9	Correções diferenciais parciais para um conjunto de satélites
16	Mensagem Especial
18	Observações Brutas da Fase da Portadora RTK
19	Observações Brutas de Pseudodistância RTK
20	Correções de Fase da Portadora RTK
21	Correções de alta precisão de Pseudodistância RTK
22	Parâmetros Estendidos da Estação de Referência
23	Registro de Definição do Tipo de Antena
24	Ponto de Referência da Antena (ARP)

FONTE: RTCM (2001)

A combinação de mensagens 22/3 melhora a performance do posicionamento cinemático, fornecendo, respectivamente, a posição da estação de referência com precisão sub-milimétrica e as coordenadas ECEF (*Earth-Centered-Earth-Fixed*) do centro de fase L1 da antena, com precisão centimétrica (RTCM, 2001). A mensagem 22, na versão 2.3, incorporou os bits GS, AT e AR, que indicam respectivamente:

GS - GNSS utilizado (0 - GPS ou 1 - GLONASS);

AT - se existe informação do tipo de antena na mensagem 23;

AR - se existe informação do ARP da antena na mensagem 24.

O centro de fase da antena (seção 2.3.3.3) varia de acordo com a direção, azimute e elevação do satélite, de forma diferente para L1 e L2, gerando erros de algumas dezenas de milímetros em relação ao centro de fase modelado. Para isso foram criadas as mensagens 23 e 24 (versão 2.3), que substituem as mensagens 22 e 3. A mensagem 23 informa o tipo de antena utilizado na estação de referência, de acordo com a nomenclatura adotada pelo IGS (*International GNSS Service*) (ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/rcvr_ant.tab). A mensagem 24 resolve o problema de variação do centro de fase, referenciando a posição a um ponto externo

e mensurável da antena, denominado ARP (*Antenna Reference Point*). Além disto, pode ser informada a altura da antena sobre o marco de referência.

O padrão RTCM versão 3.0, publicado em fevereiro de 2004, é baseado no conceito *Master-Auxiliary*, sugerido pela Leica Geosystems e a Geo++, para transmissão de mensagens de correção GPS a partir de uma rede de estações de referência, composta por uma estação Principal (*Master*) e demais estações da rede (*Auxiliary*). Segundo BROWN et al. (2005) o novo padrão possui uma performance melhor que os métodos FKP (Parâmetros de Correção de Área) e VRS (Estação de Referência Virtual) em termos de tempo de inicialização, confiabilidade, solução de ambigüidades e acurácia. As mensagens são divididas em três grupos principais: Observações, Coordenadas da Estação e Descrição da Antena (Tabela 10). Cada grupo possui diferentes níveis de mensagens de acordo com performance necessária. Por exemplo, a mensagem 1002 possui informações adicionais em relação à mensagem 1001, incluindo uma indicação da relação sinal ruído na portadora L1.

TABELA 10 - GRUPO DE MENSAGENS RTK DO PADRÃO RTCM VERSÃO 3

Nome do Grupo	Nome do sub-Grupo	Tipo de Mensagem
Observações	GPS L1	1001
		1002
	GPS L1 / L2	1003
		1004
	GLONASS L1	1009
		1010
	GLONASS L1 / L2	1011
		1012
	Coordenadas da Estação	1005
		1006
Descrição da Antena		1007
		1008
Informações Operacionais Auxiliares		1013

FONTE: RTCM (2004)

As mensagens de coordenadas da estação (1005 e 1006) estão referidas às coordenadas ECEF do ponto de referência da antena (ARP), a fim de evitar os erros decorrentes da variação do centro de fase, sendo que a mensagem 1006 complementa a mensagem 1005 com a informação da altura do ARP sobre um marco qualquer (RTCM,2004).

Em setembro de 2004 a RTCM SC-104 definiu um novo protocolo padrão para transmissão das mensagens GNSS padronizadas através da Internet, denominado NTRIP (*Network Transport of RTCM via Internet Protocol*). O NTRIP é um protocolo genérico global baseado em HTTP 1.1 (*Hypertext Transfer Protocol*) para transmissão de dados diferenciais pela Internet, que pode ser acessada através de serviços móveis de transmissão do protocolo IP, tais como GSM, GPRS, EDGE ou UMTS (LENZ,2004).

2.4.1.3 Mensagens NMEA 0183

Corresponde a um padrão de Interface, proposto pela NMEA (*U.S. National Marine Electronics Association*), que define requisitos dos sinais elétricos, protocolos e taxas de transmissão de dados e formatos específicos de mensagens (NMEA, 2007), inicialmente, para prover conexão entre equipamentos eletrônicos náuticos, tornando-se também uma interface para equipamentos GPS. O objetivo é a transmissão de dados como soluções de posição GPS, rumo, velocidade etc., possibilitando manter uma navegação em tempo real.

O padrão NMEA vem sofrendo diversas revisões ao longo dos anos, alterando a quantidade e o tipo das mensagens empregadas. O padrão mais atual é o NMEA 0183 versão 3.01 (2002), contudo a versão 2 é mais comumente aceita pela maioria dos receptores GPS.

Os dados são transmitidos através de *strings* conhecidas como mensagens NMEA. As mensagens possuem formato ASCII, com um comprimento máximo de 82 caracteres, subdivididas em campos delimitados por vírgulas, contendo os identificadores da mensagem, os dados específicos para cada tipo de mensagem e os caracteres de término da *string*. Os identificadores das mensagens são compostos por dois caracteres referentes ao sistema transmissor (*talkers*), seguidos por três caracteres específicos para cada tipo de mensagem (Tabela 11). Alguns exemplos de *talkers* podem ser “GP” para GPS, ou “GL” caso o equipamento

transmissor opere no sistema GLONASS (HOFMANN-WELLENHOF et al.,2003, p. 205). O padrão NMEA 0183 é baseado na transmissão serial de dados a uma taxa de 4.800 *bauds*, através dos protocolos RS232¹⁸ e EIA-422¹⁹. Dependendo das características do equipamento as taxas de transmissão poderão variar.

TABELA 11 - PRINCIPAIS TIPOS DE MENSAGENS NMEA 0183

Tipo	Conteúdo
GGA	Posição GPS, hora, qualidade da posição, número de satélites observados, HDOP, altura geoidal e idade das correções diferenciais
GSA	Satélites empregados na solução de posição e parâmetros DOP
GSV	Número de satélites observados e respectivas identificações, elevação, azimute e relação sinal / ruído (SNR)
GST	Informações sobre a elipse de erros das soluções de posição GPS e o desvio padrão de cada componente (latitude, longitude e altitude geométrica)
VTG	Informações de navegação de rumo verdadeiro (COG) e velocidade (SOG)
ZDA	Data e hora

2.4.1.4 Latência do Sistema

É o atraso dos dados, desde a sua coleta, processamento, transmissão e aplicação, das correções diferenciais ou observações brutas, no receptor móvel. Considerando uma latência de 1 segundo, as duplas diferenças apresentam erros centimétricos (MONICO, 2000). Portanto o ideal seria processar simultaneamente tanto as correções diferenciais quanto as medidas brutas de fase no receptor.

São utilizadas duas técnicas para reduzir a degradação em função da latência. Na primeira, denominada RTK sincronizado, a estação móvel armazena suas observações de fase por um período correspondente à latência do sistema, e as processa a partir dos dados transmitidos pela estação de referência que possuam a mesma época. Esta técnica é apropriada para aplicações que exijam elevada precisão, nos métodos em que se ocupa um ponto por alguns segundos, como no método “*stop-and-go*” (EL-MOWAFY, 2000). Uma outra técnica é o uso de um algoritmo de predição da fase da onda portadora na estação de referência, ou seja, é aplicada uma taxa de atualização das correções em função do tempo de latência,

¹⁸ RS-232 (RETMA *Standard*) / - padrão de interconexão serial binária entre um DTE (*Data Terminal Equipment*) e um DCE (*Data Circuit-terminating Equipment*), definindo níveis de voltagem, tipos de conectores, pinagens, fluxo de sinais e cabos de conexão (< http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page>. Acesso em 14 janeiro 2007)

¹⁹ EIA-422 (*Electronic Industries Alliance*) / - padrão técnico que especifica as características elétricas do circuito digital de interface de voltagem balanceada. (< http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page>. Acesso em 14 janeiro 2007)

semelhante ao fator RRC das correções diferenciais para pseudodistâncias (LANGLEY,1998).

Para aplicações da técnica RTK em levantamentos hidrográficos, considera-se que uma taxa de atualização de 10 Hz seja o mínimo aceitável, considerando os efeitos da latência (RAYMOND e BROADBENT, 2004). O uso da predição das correções diferenciais pode diminuir a latência em até 20 mseg (LEICA GEOSYSTEMS, 2005).

Os receptores RTK podem ser empregados em quatro modos de posicionamento distintos (LAMBERTI et al.,2005,p.96):

- a) RTK sincronizado (1Hz): Constitui o modo mais preciso de operação do RTK, sendo muito utilizado em aplicações dinâmicas. Utiliza taxa de atualização de 1Hz, com uma latência das posições sincronizadas (FIX), determinada, em grande parte, pelos dados transmitidos, em torno de 1 segundo para uma taxa de transmissão de 4800 *bauds*.
- b) RTK sincronizado rápido (5 ou 10Hz): possui a mesma latência e precisão do modo anterior, porém as soluções de posicionamento são produzidas 5 ou 10 vezes a cada segundo, empregando-se uma taxa de transmissão de 9600 *bauds*.
- c) RTK de baixa latência: possibilita precisões centimétricas, porém inferiores ao método sincronizado, de forma quase instantânea devido a redução da latência em até 20 ms, o que permite até 20 posições FIX por segundo. A técnica explora a drástica redução da latência, baseando-se na previsão da fase na Estação de Referência. Os erros da predição de fase, no receptor móvel, são influenciados em sua maioria pela instabilidade dos relógios e variações inesperadas das órbitas dos satélites.
- d) RTK com linha de base móvel: modo de posicionamento RTK onde a estação de referência e o receptor estão em movimento. O receptor da estação de referência transmite as medidas efetuadas para o outro receptor móvel, que calcula a solução RTK sincronizada a 1, 5 ou 10Hz, fornecendo informações de orientação, velocidade e atitude com precisão centimétrica. Este método pode ser utilizado, por exemplo, para determinação de atitude de embarcações e alinhamento entre sensores em sistemas multifeixe (CLARKE,2003). Para a obtenção de bons resultados, a distância entre a Estação de Referência e o receptor móvel não deverá ser superior a 1 km.

2.4.1.5 Meios de Comunicação

O enlace de dados entre a estação de referência e o receptor móvel dependerá do volume de dados a ser transmitido, em função do número de satélites rastreados, tipo e formato dos dados, requisitos de integridade e confiabilidade, condições de operação e distância entre as estações transmissora e receptora (EL-MOWAFY,2000), além da taxa de atualização requerida na estação móvel. Para se obter uma boa precisão com as técnicas diferenciais, a partir da observação da fase da onda portadora, empregando as mensagens 18 e 19, é necessária uma taxa de atualização dos dados na estação móvel em períodos de 0,5 a 2 segundos (LANGLEY,1998). Isto requer elevadas taxas de transmissão de dados (2400 a 9600 bps), o que limita a faixa de frequência com largura de banda suficiente para a transmissão deste volume de dados. Os canais de comunicação que atendem a estas demandas podem ser:

Rádio transmissão

A grande quantidade de dados a serem transmitidos, associada a altas taxas de atualização necessárias para a precisão centimétrica do RTK, exige o uso de taxas de transmissão de pelo menos 2400 bps. As únicas faixas do espectro rádio que suportam estas larguras de banda são o VHF/UHF. Porém estas frequências possuem um alcance limitado à linha do horizonte. A distância máxima teoricamente alcançada é dada por (LANGLEY,1998):

$$d = 3,57\sqrt{k} \cdot (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r}) \quad (2.64)$$

onde:

d é o alcance máximo entre as estações de referência e móvel;

k - fator de compensação da refração atmosférica, estimado em 1,33 para condições atmosféricas normais (LANGLEY,1998); e

h_t, h_r - altura em metros das antenas do transmissor e receptor, respectivamente.

O alcance depende ainda da sensibilidade da antena do rádio receptor, uma vez que o sinal transmitido sofre uma atenuação, mesmo na ausência de obstruções, proporcional à quarta potência da distância (LANGLEY,1998). Este problema pode ser solucionado com a utilização de antenas direcionais repetidoras.

Telefonia celular

Possui grande largura de banda, porém ainda apresentam um alto custo e a limitação de apenas um usuário por canal. Podem ser utilizadas as seguintes técnicas:

GSM (*Global System for Mobile Communications*) - padrão mundial de telefonia celular, que opera na faixa de frequência de 900 MHz e permite a transmissão de voz e dados;

GPRS (*General Packet Radio Service*) - sistema global de comunicação móvel que permite aumentar a velocidade de transmissão para até 115.000 bps;

EDGE (*Enhanced Data rate for Global Evolution*) - utiliza um novo padrão de modulação denominado 8PSK (8 Phase Shift Keying Modulation), permitindo uma taxa de dados três vezes maior que os sistemas GSM (384 Kbps); e

UMTS (*Universal Mobile Telephone System*) - sistema europeu de comunicação móvel por satélite, com taxas de transmissão de até 2Mbps, permite transmissões multimídia (LENZ,2004).

Internet

Utiliza mensagens do padrão RTCM NTRIP versão 1.0. Não possui limitação de banda para mensagens GNSS e podem atender a um número ilimitado de usuários. Geralmente são transmitidas empregando uma das técnicas da telefonia celular acima descrita.

Satélites geoestacionários

Comumente utilizados para comunicações, possuem grande largura de banda, um alcance global, porém têm um elevado custo. São utilizados por sistemas que operaram em rede, como por exemplo o WADGPS (*Wide Area DGPS*).

2.4.2 Sistemas de Posicionamento DGPS

Como exposto na seção 2.4, este método tem sido empregado no posicionamento de uma estação móvel a partir das correções diferenciais do código, ou do código suavizado pela fase da onda portadora, geradas e enviadas por uma estação de referência, instalada sobre um ponto de coordenadas conhecidas nas proximidades da estação móvel.

No Brasil esta técnica tem sido empregada a partir de uma rede de estações de referência DGPS baseadas em radiofaróis, que transmitem correções diferenciais através dos sistemas de radionavegação, com o propósito de melhorar a acurácia da navegação marítima em portos e canais de acesso. Outras atividades como levantamentos hidrográficos e serviços de sinalização náutica têm tirado proveito destas estações para posicionamento (BRIONES,1999) horizontal. Normalmente transmitem as mensagens RTCM 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 e 16.

O Brasil possui uma rede constituída por 11 ERDGPS (Estação de Referência DGPS), baseadas em radiofaróis operados pela Marinha do Brasil, cujas características são apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA DGPS DO LITORAL BRASILEIRO.

LOCALIZAÇÃO	FREQ (Khz)	TX. (bps)	LATITUDE (SISTEMA WGS84)	LONGITUDE (SISTEMA WGS84)	IDENT.	ALCANCE (milhas)
ABROLHOS	290	100	17° 57' 53,0" S	038° 41' 38,2" W	0461	300
ARACAJU	320	100	10° 58' 10,7" S	037° 02' 11,1" W	0468	300
CALCANHAR	305	100	05° 09' 36,813" S	035° 29' 15,171" W	0467	300
CANIVETE	310	100	00° 30' 31,606" S	050° 24' 50,127" W	0463	300
ILHA DO MEL	320	100	25° 29' 41,334" S	048° 19' 35,19" W	0470	300
ILHA RASA	315	100	26° 00' S	043 ° 06" W	0469	300
MOELA	305	100	24° 02' 51,9" S	046° 15' 48,2" W	0462	300
RIO GRANDE	290	100	32° 08' 54,1" S	052° 06' 11,7" W	0464	300
SANTA MARTA	310	100	28° 36' 16,2" S	048° 48' 50,1" W	0466	300
SÃO MARCOS	300	100	02° 29,337' S	044° 18,086' W	0460	200
SÃO TOMÉ	300	100	22° 02' 32,3" S	041° 03' 10,7" W	0465	300

Fonte: SPG (2006)

Verifica-se na Tabela 12 que as faixas de frequência empregadas (LF e MF) possuem estreitas larguras de banda, capazes de suportar o reduzido volume de dados transmitidos pelas estações de referência (mensagens RTCM), através de baixas taxas de transmissão (100 bps). Por estas características as ERDGPS não podem ser empregadas nas técnicas RTK, que exigem maiores larguras de banda e taxas de transmissão acima de 4800 bps.

O emprego de frequências das faixas LF e MF possibilita maiores alcances. Entretanto, a qualidade das posições DGPS depende do grau de correlação espacial entre a estação de referência e o receptor móvel, ou seja, à medida que se aumenta a distância entre ambas, a operação de diferenciação não permite uma compensação completa dos erros troposféricos e ionosféricos no receptor móvel. A latência (seção 2.4.1.4) das correções diferenciais também influenciam diretamente na qualidade do posicionamento DGPS.

Os sistemas DGPS, sobretudo a partir da implantação da rede ERDGPS (Estações de Referência DGPS), têm sido amplamente empregados no posicionamento horizontal das sondagens reduzidas. BRIONES (1999) estudou a degradação da posição DGPS imposta pela correlação espacial, a partir de um erro inicial próximo a estação de referência de 5 m (BRIONES, 1999, p. 94), obtendo uma degradação de 11,5 ppm da distância, em quilômetros, entre as estações de referência e móvel (BRIONES, 1999, p.93). Estes valores, conforme a Tabela 1, inviabilizaria o emprego deste método de posicionamento em levantamentos de Ordem Especial. Entretanto, PRADO (2001) realizou análises de ocupações DGPS em períodos de aproximadamente 15 minutos ao longo de linhas de base de até 29 km, e cerca de 80% dos erros horizontais não ultrapassaram 1,5 m, e 3,2 m para os erros verticais, ao nível de confiança de 99,73%. MONTEIRO e MARREIROS (2003) também realizaram investigações da acurácia DGPS ao longo do canal de acesso ao porto de Lisboa, e obtiveram erros horizontais inferiores a 3 m (dRMS), contudo não fazem referência aos comprimentos das linhas de base.

2.4.3 Técnica *Real Time* GIPSY (RTG)

Esta técnica é incorporada por alguns serviços comerciais WADGPS, que provêm correção diferencial global GPS (GDGPS - *Global Differential GPS*). A tecnologia GDGPS²⁰ foi financiada pelo *NASA's Earth Science Technology Office* e desenvolvida pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) em apoio a missões científicas, em qualquer parte do planeta, que necessitavam de posicionamento em tempo real com acurácias compatíveis com as obtidas em métodos pós-processados (ARROYO-SUAREZ et al., 2005). Baseados em melhorias e refinamentos do

²⁰ Também pode ser denominada GcGPS (*Global corrected GPS*)

algoritmo GIPSY-OASIS II (*GPS Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis Simulation Software*), foi desenvolvido o *Real Time* GIPSY (RTG), que estima e modela com precisão vários parâmetros e fontes de erros dos satélites GPS, através de dados recebidos em tempo real, via Internet, de uma rede global de estações de referência, gerando correções para as órbitas e relógios de cada satélite GPS ativo, que são retransmitidas para os usuários através da Banda-L dos satélites de comunicação INMARSAT (1525-1565 MHz).

A rede C-Nav GcGPS (FIGURA 20) é formada por 53 estações de referências, operadas pela NavCom e JPL, sendo quatro estações principais (*Master*). Colorado Springs (Colorado), Naval Observatory (Maryland), Torrance (Califórnia) e Moline (Illinois) e três NPH (*Network Processing Hubs*): Torrance (Califórnia), Moline (Illinois) e Pasadena (Califórnia). São empregados ainda três satélites geo-estacionários de comunicações: Américas (98°W), EMA (25°E) e ASPAC (109°E), cujos centros de controle localizam-se em Laurentides (Canadá), Goonhilly (Reino Unido) e Auckland (Nova Zelândia).

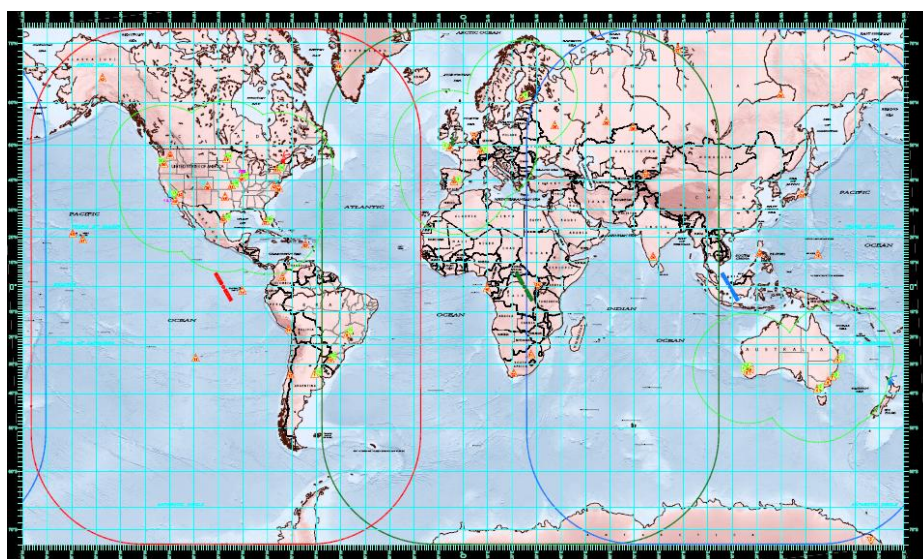


FIGURA 20 - REDE C-NAV GcGPS
 FONTE: <www.cctechol.com>. Acesso em 17 maio 2006

Os NPH processam as observações GPS brutas de dupla frequência oriundas das estações de referência da rede, e geram um conjunto de correções RTG, baseadas em combinações lineares livres dos efeitos ionosféricos. Estas correções são transmitidas, via *link* de comunicações terrestres, aos centros de controle dos satélites geo-estacionários para retransmissão aos usuários do sistema (HUDSON e

SHARP, 2001). Observações GPS de dupla frequência e o emprego de modelos troposféricos, pelos receptores dos usuários, possibilitam precisões horizontais subdecimétricas, segundo os fabricantes.

O C-Nav (*C&C Technologies, Inc.*) é uma versão do sistema StarFire (*Navcom e Ag Management Systems - AMS*) para aplicações em ambiente marinho, baseado em uma arquitetura de dupla frequência, com correções das órbitas e dos relógios dos satélites geradas a partir de uma rede global de estações de referência operada pela NavCom e JPL. Os efeitos troposféricos são modelados pelo modelo UNB3²¹, enquanto o multicaminho é minimizado através da aplicação de avançadas técnicas de suavização da portadora (CLARKE et al., 2005). Ele depende da aplicação de correções das marés terrestres, não necessárias nos sistemas RTK em função das linhas de bases curtas sofrerem as mesmas influências (ARROYO-SUAREZ et al., 2005). O equipamento consiste em um único módulo que concentra uma antena, que recebe sinais nas portadoras L1, L2 e banda-L do INMARSAT, um demodulador do sinal INMARSAT e um receptor GPS.

Neste trabalho foi utilizado o sistema C-Nav da *C&C Technologies Inc.*, empregando-se o receptor C-Nav 2050M (FIGURA 21), que consiste em uma antena de três bandas (L1, L2 e L-INMARSAT) que integra também um demodulador para o sinal de correções INMARSAT, além da unidade receptora, conforme a FIGURA 21. A visualização das informações pode ser realizada através do display *C-Navigator*, ou através do software StarUtil. A versão do *firmware* utilizada foi 14.3. Segundo o fabricante esta antena possui centro de fase estável para observações GPS L1 e L2.



FIGURA 21 - RECEPTOR C-NAV 2050M E ANTENA TRI-BAND

²¹ Modelo para cálculo das variações regionais e sazonais do atraso troposférico, baseado nos algoritmos de atraso zenital de Saastamoinen, funções de mapeamento de Niell e uma tabela de parâmetros atmosféricos (COLLINS e LANGLEY, 1999).

3. LEVANTAMENTOS REALIZADOS

Para a consecução do objetivo do trabalho, foi realizado um levantamento hidrográfico (LH), de acordo com as Instruções Técnicas da DHN, no período de 17 a 28 de julho de 2006. O LH visava a coleta de dados batimétricos, através de um ecobatímetro monofeixe, aos quais seriam aplicadas reduções batimétricas pelo método tradicional, baseado em marégrafos, e pelo método GPS diferencial preciso, a partir das altitudes elipsoidais.

A execução do LH compreendeu as atividades apresentadas na FIGURA 22, envolvendo uma fase inicial de planejamento e preparação (planejamento), e na fase seguinte, a coleta dos dados em campo (execução). Os processamentos e análises resultantes serão descritos na seção 4.

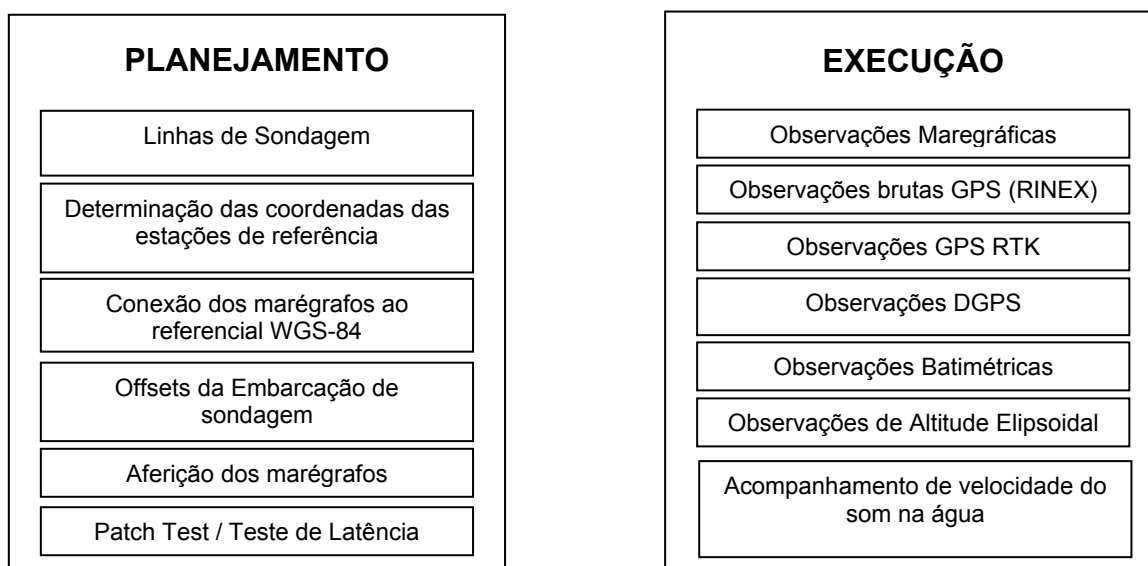


FIGURA 22 - FASES DO LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO

A fase de planejamento envolve a realização de levantamentos específicos visando a execução das reduções batimétricas a partir dos métodos GPS diferenciais. Entre eles, a conexão dos marégrafos ao referencial WGS-84 G1150, que permite o cálculo da separação vertical entre o nível de redução local e o elipsóide de referência associado ao WGS-84 G1150, e principalmente, a determinação da altura precisa da antena GPS em relação a um referencial fixo da embarcação de sondagem.

Os elementos de planejamento e execução, bem como os equipamentos utilizados em cada uma das etapas são descritos na Tabela 13.

TABELA 13 - ELEMENTOS DE PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO LH

Levantamento: Carta 1512 - Baía de Guanabara		
Estações Maregráficas de Referência:		50140 - Ilha Fiscal
		50141 - Ponta da Armação
Ecobatímetro:	ODOM HYDROTRAC v. 2.12 monofeixe	
Sensor Inercial:	TSS 335B	
Sistemas de Posicionamento:	RTK	Trimble 7400DSi & 7400RSi
		FlexPak (NovAtel) ⁽³⁾
		Leica GX1230 ⁽¹⁾
	RTG	C-Nav 2050M ⁽²⁾
	DGPS	Trimble NT200D
Estações de Referência:		Ashtech Z-XII ⁽¹⁾
	RTK	BNDO (Leica GPS1200)
		PILA (Trimble 7400)
		PDAR (FlexPak)
	DGPS	GUAR - Ashtech Z-XII
Estação base para pós-processamento:		RIOD (Rio de Janeiro) da RBMC
Embarcação de sondagem:		LB "SO Oliveira" (CAMR)
Programa de aquisição automática		HYPACK v. 4.3a GOLD

(1) Receptores também empregados para aquisição de observações brutas GPS (mensagens RINEX)

(2) Equipamento cedido pela empresa C&C Technologies do Brasil, configurado apenas para utilização *offshore* (sem correções de marés terrestres).

(3) Equipamento cedido pela empresa SighGPS

3.1 PLANEJAMENTO

Abrange as atividades que devem ser conduzidas antes do levantamento, a fim de garantir a qualidade dos dados que serão processados e analisados, maximizando ao máximo os recursos disponíveis e reduzindo custos. Se o planejamento for minucioso, aumentam as chances de sucesso do levantamento (IHO, 2005, p.409).

Para este estudo foram realizados os levantamentos e atividades de planejamento e preparação sumarizados na FIGURA 22, e descritas na sequência.

3.1.1 Área de estudo e planejamento das linhas de sondagem

Uma das maiores fontes de erros nas sondagens reduzidas são as correções de marés, tomadas a partir de mareógrafos na costa (USACE, 2004, p. 4-9). Estes erros estão diretamente correlacionados com as incertezas no cálculo dos níveis de redução locais, aumentando também à medida que se afasta da costa, ou que se distancie da estação maregráfica de referência do LH. Nestas áreas o método diferencial RTK (seção 2.4.1) é a única maneira efetiva de proporcionar uma correção de maré mais acurada (USACE, 2004, p.4-11).

Por se tratar da primeira pesquisa nacional da aplicação dos métodos GPS diferenciais precisos em levantamentos hidrográficos, o foco principal é a validação das correções de marés RTK (T_2) (seção 2.2.2), a partir de sua comparação direta com as reduções batimétricas tradicionais. Logo a área de estudo deverá proporcionar correções de marés de mesma qualidade, para ambas as metodologias. Sendo assim, a área de estudo deverá estar próxima a estações maregráficas, com séries temporais de no mínimo um ano, a fim de possibilitar a determinação das constantes harmônicas (seção 2.1.4.1) envolvidas no cálculo do NR (seção 2.1.4.2), minimizando as incertezas na sua determinação. O desejável é que a estação maregráfica possua séries de longo período, permitindo uma melhor análise da precisão do NR, através do estudo da sua variabilidade ao longo do tempo.

A área escolhida para este trabalho localiza-se na Baía de Guanabara, Rio de Janeiro (FIGURA 23). O controle de marés foi realizado pelas estações maregráficas da Ilha Fiscal (estação 50140) e Ponta da Armação (estação 50141), ambas com suas constantes (Z_0 e S_0) determinadas por séries temporais com um mínimo de um ano. Para uma boa definição da maré e redução dos efeitos das desigualdades diurnas, o levantamento batimétrico foi conduzido em períodos de sizígia. As fichas das estações maregráficas empregadas estão nos Anexos 1 e 2.

As linhas de sondagem Norte-Sul (NS) e Leste-Oeste (EW) foram planejadas de modo a gerar um máximo de pontos de controle, determinados pelas

intersecções entre si, embora este padrão não seja utilizado em levantamentos batimétricos convencionais. Esta disposição das linhas de sondagem visa permitir um cruzamento aproximadamente perpendicular às linhas isobatimétricas (IHO 2005, p.413) de 10 e 20 metros.

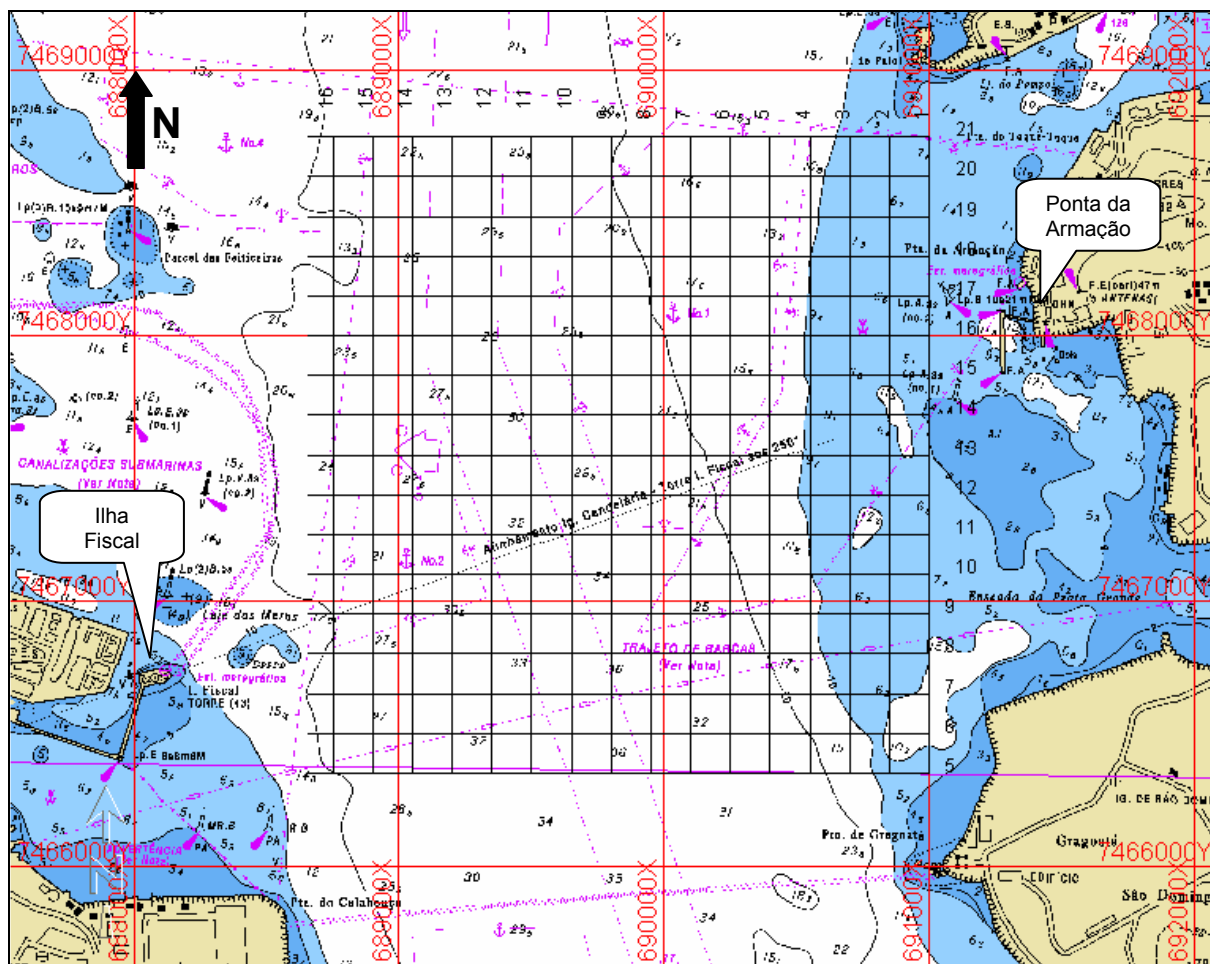


FIGURA 23 - ÁREA DE PESQUISA (BAÍA DE GUANABARA - RJ)

Deste modo serão percorridas 17 linhas no sentido N-S e 16, no sentido E-W, com um espaçamento de 150 metros, totalizando 44,8 milhas náuticas percorridas (aproximadamente 82,9 km).

3.1.2 Estações de Referência RTK / DGPS

As estações de referência para os equipamentos RTK e DGPS foram estabelecidas sobre marcos existentes no Complexo Naval da Ponta da Armação (CNPA), em Niterói/RJ, de modo que a maior linha de base durante o levantamento

foi de aproximadamente 3,5 km. As coordenadas destes marcos foram recalculadas através de um posicionamento relativo estático, com sessões de 6 horas, tomando por base a estação da RBMC RIOD (Rio de Janeiro). A intenção do reprocessamento foi melhorar a qualidade das coordenadas dos marcos (coordenadas CHM da Tabela 15), uma vez que a estação base (GUARITA DHN 20) empregada no processamento das demais estações foi obtida através de soluções “float” a partir da estação RBMC VICO (Viçosa), distante aproximadamente 238 km do CNPA. Para a coleta das observações GPS de dupla frequência foram empregados os receptores geodésicos Ashtech Z-XII, Trimble 4000SSi e 4000SSE, com máscara de elevação de 10° para minimização dos erros troposféricos e efeitos de multicaminho, sendo as alturas das antenas inclinadas tomadas no TGP, exceto para o marco PILA, onde a altura vertical da antena foi referida ao ARP. O processamento foi realizado com o programa GPSurvey 4.35, empregando-se efemérides transmitidas e máscara de elevação de 15°, o que, em função da linha de base curta (19 km), permitiu a obtenção de soluções fixas.

As informações dos rastreios são resumidas na Tabela 14 e as coordenadas de cada estação constam na Tabela 15.

TABELA 14 - DADOS DE RASTREIOS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RTK / DGPS

Marco	Nome da Estação	Ficha de Referência	Sessão (UTC)	Receptor	Antena
BNDO	RACAL BNDO	F-21-1515-003/00	18JUL 17:41 às 23:56	Ashtech Z-XII	AHS700700.B
GUAR	GUARITA DHN 20	F-21-1515-001/00	18JUL 18:38 às 00:39	Trimble 4000SSE	TRM33429.00
PILA	BNDO	F-21-1515-004/00	20JUL 12:17 às 18:43	Trimble 4000SSi	TRM14532.00
PDAR	PRAÇA D'ARMAS	F-21-1515-005/00	18JUL 18:41 às 00:55	Trimble 4000SSi	TRM14532.00

TABELA 15 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA RTK / DGPS

Marco	Coordenadas CHM (Sistema WGS84)	Sigma (m)	Coordenadas Calculadas ⁽¹⁾ (Sistema WGS84)	Sigma (m)	Diferenças (m)
BNDO	22° 53' 05",2455 S	0,051	22° 53' 05",243964 S	0,002	0,0472
	043° 07' 58",4939 W	0,051	043° 07' 58",496873 W	0,002	0,0849
	5,1810 m	0,144	5,2548 m	0,006	0,0738
GUAR	22° 52' 56",2497 S	0,039	22° 52' 56", 246407 S	0,002	0,1012
	043° 07' 58",3640 W	0,039	043° 07' 58", 364729 W	0,002	0,0208
	27,0990 m	0,047	27,0998 m	0,006	0,0008
PILA	22° 53' 05",4257 S	0,047	22° 53' 05", 423267 S	0,002	0,0835
	043° 07' 58",2330 W	0,047	043° 07' 58", 23695 W	0,002	0,1037
	8,5495 m	0,064	8,9482 m	0,008	0,3565
PDAR	22° 52' 59",1956 S	0,047	22° 52' 59", 193558 S	0,002	0,0627
	043° 08' 02",4880 W	0,047	043° 08' 02", 491384 W	0,002	0,0967
	10,3364 m	0,064	10,5153 m	0,007	0,1789

FONTE: CHM (2000)

NOTA: As diferenças de coordenadas foram calculadas de acordo com RICHARDUS e ADLER (1972), descrito no capítulo 5.

(1) Coordenadas obtidas através de soluções fixas a partir da estação RIOD da RBMC

Apesar da baixa precisão vertical do método DGPS, com correções diferenciais baseadas no código C/A da portadora, a maioria dos LH conduzidos pela Marinha, tem utilizado este método, baseado nas ERDGPS (Estações de Referência DGPS) instaladas nas proximidades dos radiofaróis (seção 2.4.2), o que tem atendido aos requisitos da IHO para o posicionamento horizontal em levantamentos de Ordem Especial e de Primeira Ordem. Em função disto, também foram incluídas observações DGPS empregando os receptores Trimble NT200D, cuja estação de referência era o RF da Ilha Rasa, e o receptor Ashtech Z-XII, com estação de referência no marco GUAR.

3.1.3 Conexão dos marégrafos ao referencial WGS-84 G1150.

A IHO recomenda, desde 1998, que as observações maregráficas também sejam referenciadas a um sistema geocêntrico, através da determinação das coordenadas geodésicas das RRNN associadas aos marégrafos da área de trabalho, referenciadas ao WGS-84 G1150, para que futuramente possam ser integradas às técnicas espaciais (IHO, 1998, p.11). Isto permite a determinação da separação vertical entre o NR local e o elipsóide de referência, necessária para aplicação das reduções batimétricas RTK.

Para a conexão dos marégrafos são conduzidas duas operações: nivelamento geométrico da régua do marégrafo e cálculo da altitude geométrica, por meio de posicionamento GPS relativo estático, de pelo menos uma RN associada ao marégrafo. Segundo a NOAA, para a conexão de marégrafos é preferível a realização de duas sessões de rastreios de no mínimo 6 horas sobre as RRNN, com intervalo de meia hora. Isto possibilita uma constelação de satélites diferente entre as sessões realizadas (NOAA, 2003, p.4).

Para este trabalho foram utilizadas as RRNN, pertencentes ao IBGE, 93517 SAT (Ilha Fiscal) e 2994L (Ponta da Armação). A RN 2994L foi renomeada pelo IBGE como Estação 93518 SAT. Estes marcos foram selecionados por serem conhecidas suas altitudes ortométricas, que serão empregadas posteriormente para o cálculo das alturas das antenas GPS sobre a linha d'água da embarcação de sondagem. Suas coordenadas estão descritas na Tabela 16.

As altitudes geométricas empregadas para o cálculo das separações verticais foram obtidas a partir do processamento dos dados de duas sessões de rastreamento GPS, com duração de 6 horas e intervalo de meia hora entre si, empregando os receptores Trimble 4000SSi e 4000SSE, ambos com antenas de dupla frequência dotadas de *groundplane*, para minimização dos efeitos de multicaminho. Foi utilizado o programa GPSurvey versão 2.35, tomando-se como base a estação RIOD (Rio de Janeiro) pertencente a RBMC.

TABELA 16 - COORDENADAS DAS RRNN DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS

RN	Coordenadas IBGE (SIRGAS 2000)	Sigma	Coordenadas calculadas (SIRGAS 2000)	Sigma	Estação Maregráfica
SAT 93518	22° 52' 59,3149" S 43° 08' 05,0240" W -4,22 m Altitude Ortométrica: 2,02 m	0,006 m 0,005 m 0,050 m	22° 52' 59,314711" S 43° 08' 05,024179" W -4,199 m	0,002 m 0,002 m 0,005 m	Ponta da Armação
SAT 93517	22° 53' 47,9166" S 43° 09' 57,6082" W -3,51 m Altitude Ortométrica: 2,68 m	0,006 m 0,006 m 0,052 m	22° 53' 47,916930" S 43° 09' 57,608091" W -3,54 m	0,000769 0,000769 0,005708	Ilha Fiscal

FONTE: IBGE (2006)

O nivelamento geométrico permite referenciar o nível de redução da estação maregráfica à RN de coordenadas geodésicas geocêntricas conhecidas, obtendo-se a separação vertical entre o referencial WGS-84 G1150 e o NR. A partir do nivelamento geométrico é possível também verificar eventuais deslocamentos sofridos pela régua, o que alteraria não somente as leituras, mas o valor das correções T_1 (seção 2.2.1). Foi empregado o nível Leica NA724, e os resultados são apresentados na Tabela 17.

TABELA 17 - RESULTADO DO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO NAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DE REFERÊNCIA

Estação Maregráfica	Pontos Visados		Desnível (m)
	AV	AR	
Ilha Fiscal	Régua ⁽¹⁾	RN-2953H	-0,123
	RN-2953H	93517 SAT	-0,251
Ponta da Armação	RN-1	RN-2994L	0,028
	RN-2994L	Régua ⁽²⁾	0,212

(1) Mira posicionada sobre a graduação de 5,0 metros da régua

(2) Mira posicionada sobre a graduação de 3,8 metros da régua

Os valores de Z_0 (seção 2.1.4.2), altura do NR sob o nível médio do mar, estão descritos pelas fichas F-41-1515-001/05 (Ilha Fiscal) e F-41-1515-001/85

(Ponta da Armação), ambas atualizadas no ano de 2005, obtidos por análise harmônica de séries maregráficas de aproximadamente dois anos.

A altura do elipsóide de referência associado ao WGS-84 G1150 em relação ao NR na estação maregráfica pode ser dada pela expressão (2.34) e aqui reescrita para melhor compreensão, obtida a partir da altitude elipsoidal h de uma RN associada à régua do marégrafo (comprimento r), através do desnível Δh , de uma estação maregráfica cujos parâmetros de altura do nível médio do mar em relação ao zero da régua (S) e altura do nível de redução sob o nível médio do mar (Z) estejam bem definidos

$$\beta = h - (r + \Delta h) + (S - Z) \quad (3.1)$$

Aplicando os valores obtidos nas Tabelas 16 e 17, juntamente com os dados das fichas das estações maregráficas obtêm-se os valores das separações verticais WGS-84 G1150 - NR em ambas as estações, descritas nas FIGURAS 24 e 25.

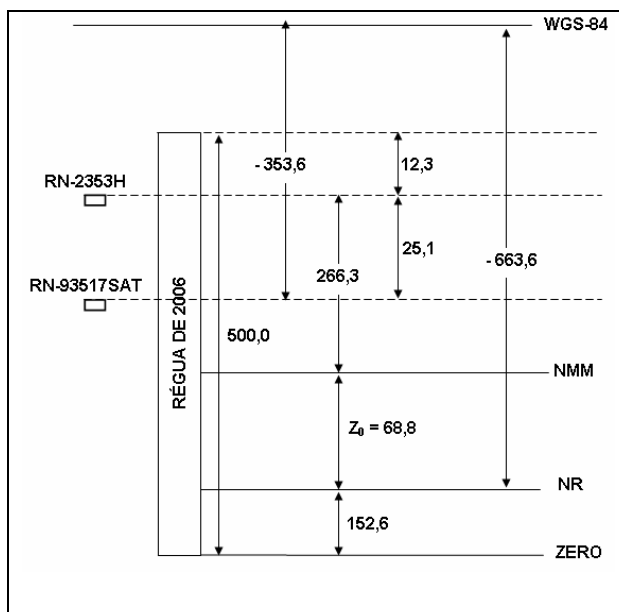


FIGURA 24 - SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 G1150 - NR PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA ILHA FISCAL (UNIDADES EM cm)

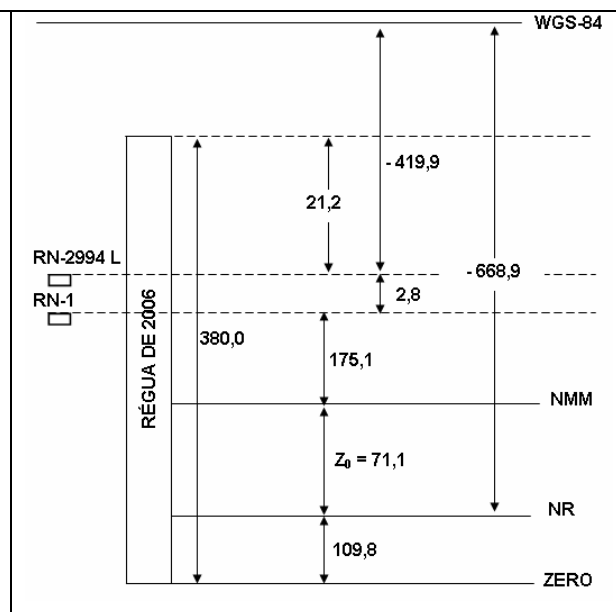


FIGURA 25 - SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 G1150 - NR PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO (UNIDADES EM cm)

Os valores das separações verticais são negativos, já que o elipsóide associado ao WGS-84 G1150 encontra-se acima do NR local. As diferenças entre os valores de Z_0 das estações maregráficas é de 2,3 cm, o que indica um comportamento de maré semelhante, perfeitamente compatível com suas

localizações, distantes aproximadamente 4 km entre si. Por representarem o comportamento de maré na mesma área as separações verticais WGS-84 G1150 - NR em ambas difere de apenas 5,3 cm.

3.1.4 Determinação dos *offsets* da embarcação de sondagem

Os *offsets* da embarcação de sondagem, altura da antena GPS e profundidade medida pelo ecobatímetro, devem estar referenciados à mesma origem. Esta origem muitas vezes é a linha d'água estática, que normalmente corresponde a um calado médio marcado no casco, e é determinada com a embarcação docada, situação ideal para medida dos *offsets* através de métodos topográficos. Contudo, na prática isto nem sempre é possível. Podem ser usados os planos da embarcação, marcações no casco de calado, trenas milimétricas ou métodos topográficos. Segundo ALKAN e PALANCIOGLU (1999), o fator mais importante na observação de maré baseada em navios é a determinação precisa da altura da antena em relação à linha d'água da embarcação.

GOLDAN (1994) apresenta um método a partir de estações maregráficas de referência onde a relação entre altitudes ortométricas e elipsoidais possam ser determinadas, permitindo o cálculo preciso da altura da antena GPS sobre a superfície do mar (FIGURA 26).

A altura da antena pode ser alterada em função da mudança de atitude da embarcação (ângulos de *pitch* e *roll*), exigindo o emprego de um sensor inercial para aplicação destes ângulos de rotação ao vetor da antena RTK (CLARKE et al., 2005).

Da FIGURA 26, a altura do nível do mar instantâneo (SL) em relação ao geóide é dada por:

$$SL = PA - PNP \quad (3.2)$$

Onde:

PA é a leitura instantânea da régua; e

PNP é a altura do zero da régua em relação ao geóide. Seu valor é determinado a partir do nivelamento geométrico de uma RN de altitude ortométrica conhecida.

A altitude ortométrica de uma RN de referência (H_{ref}) é dada por:

$$H_{ref} = h_{ref} - (N_{ref} + dN_{ref}) \quad (3.3)$$

onde:

h_{ref} - é a altitude elipsoidal da RN;

N_{ref} - altura do geóide na RN; e

dN_{ref} - erro na determinação da altura do geóide.

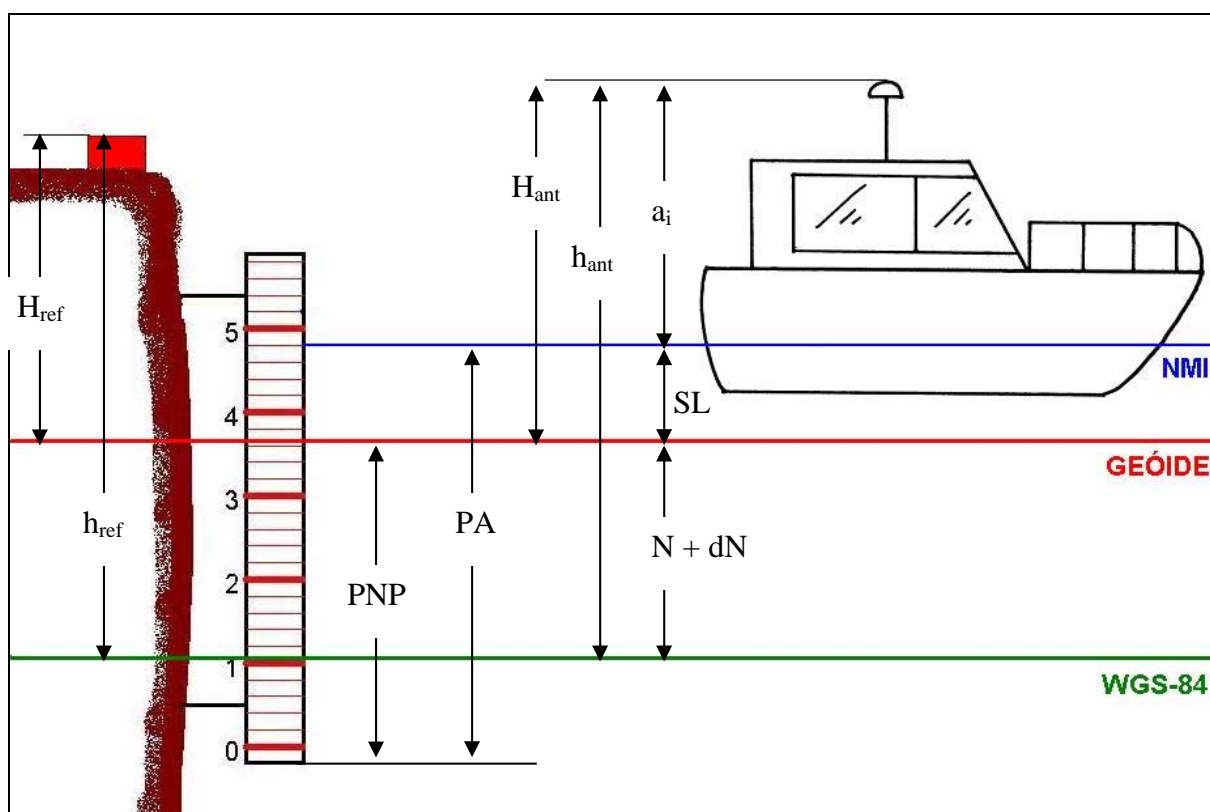


FIGURA 26 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA ANTENA GPS

A altura da antena GPS sobre o nível do mar instantâneo é:

$$a_i = H_{ant} - SL \rightarrow a_i = h_{ant} - N_{ant} - dN_{ant} - SL \quad (3.4)$$

onde:

h_{ant} - é a altitude elipsoidal da antena GPS instalada na embarcação de sondagem;

N_{ant} - altura do geóide no local onde se encontra posicionada a embarcação; e

dN_{ant} - erro na determinação da altura do geóide no local onde se encontra posicionada a embarcação.

Substituindo a equação (3.2) na equação (3.4), e o valor de dN dado pela equação (3.3), considerando iguais os erros na determinação da altura do geóide, tem-se:

$$a_i = h_{ant} - N_{ant} - h_{ref} + N_{ref} + H_{ref} - PA + PNP \quad (3.5)$$

A distância entre a embarcação de sondagem e a RN de referência é muito pequena, logo pode-se considerar que $N_{ref} = N_{ant}$. A equação (3.5) pode ser simplificada por:

$$a_i = h_{ant} - h_{ref} + H_{ref} - PA + PNP \quad (3.6)$$

A determinação precisa da altura da antena sobre o nível do mar foi obtida pela média dos valores dados pela expressão (3.6), obtidos a partir das observações maregráficas (PA) e altitudes elipsoidais (h_{ant}), de acordo com os períodos apresentados na Tabela 18, considerando apenas as altitudes elipsoidais geradas a partir de todas as soluções fixas das ambigüidades com dupla frequência, amostradas a uma taxa de 15 segundos.

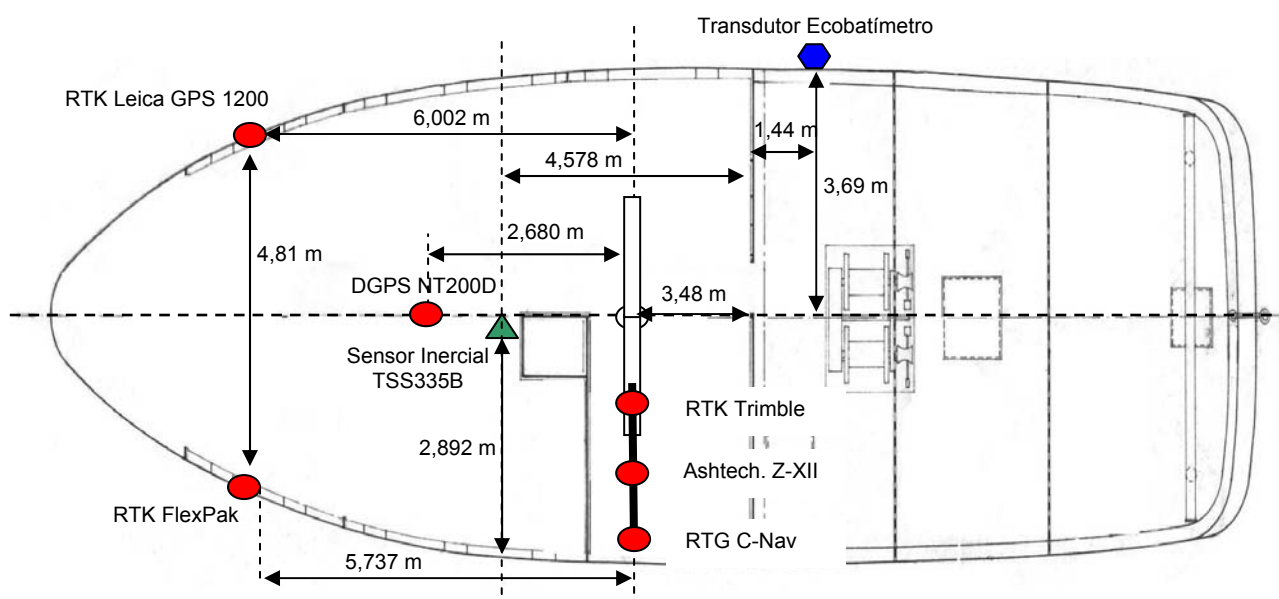


FIGURA 27 - OFFSETS HORIZONTAIS DA LANCHA "SO OLIVEIRA"

A altura da antena deve ser calculada novamente, empregando a mesma metodologia, após os levantamentos, para verificar a ocorrência de alterações significativas de calado durante o levantamento.

A FIGURA 27 apresenta a distribuição horizontal dos equipamentos a bordo da embarcação (antenas GPS, transdutor do ecobatímetro e sensor inercial TSS335B), e a FIGURA 28, o posicionamento das antenas dos receptores Trimble 7400, Ashtech Z-XII e C-Nav 2050M, na verga²² do mastro.

Não foi possível a determinação dos *offsets* por métodos topográficos, desta forma, foram utilizadas trenas milimétricas e os planos da embarcação de sondagem para o cálculo dos *offsets* horizontais, e o método de GOLDAN (1994) para a obtenção das alturas das antenas dos receptores RTK / RTG. Por este último método a altura da antena é determinada em relação a uma linha d'água média durante o período de observação considerado no seu cálculo.

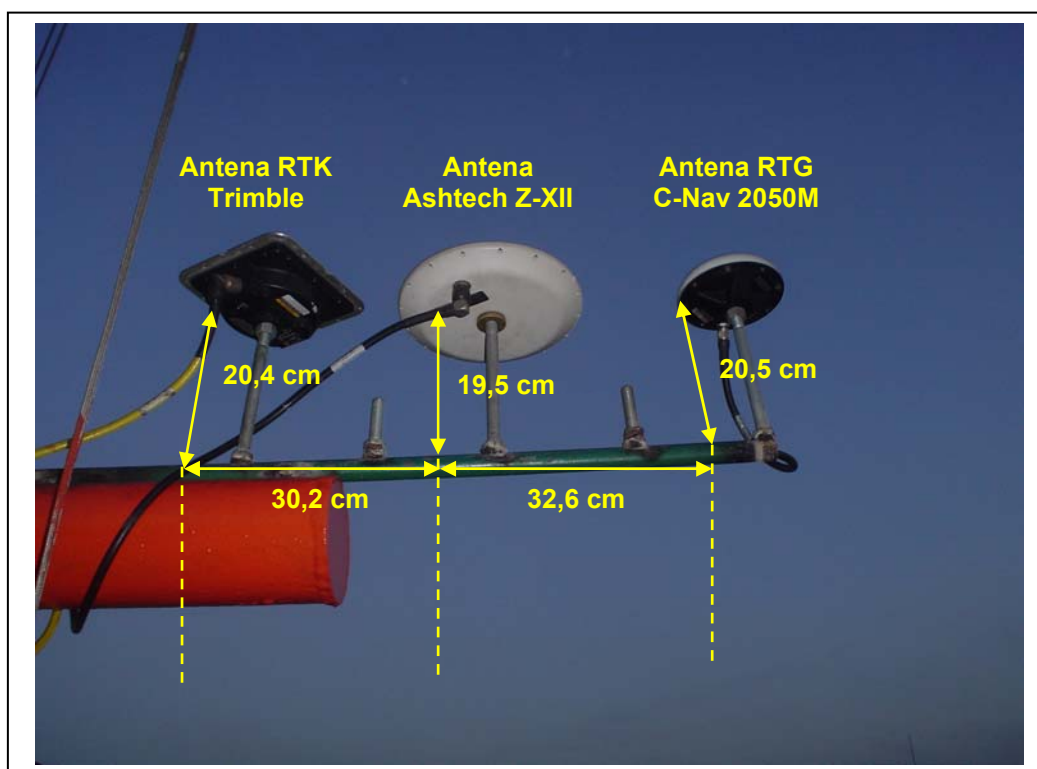


FIGURA 28 - OFFSETS DAS ANTENAS GPS INSTALADAS NO MASTRO

Os períodos analisados, quantidades de amostras e os resultados obtidos para as alturas das antenas GPS RTK Trimble 7400, RTK FlexPak e RTG C-Nav 2050M são apresentados na Tabela 18.

²² Peças de madeira ou de ferro que se cruzam nos mastros ou mastaréus, por ante-a-vante, orientadas de bombordo para boreste (FONSECA, 2002, p. 572)

As observações para o cálculo das alturas das antenas foram realizadas com a embarcação atracada próxima aos maregrafos da Ilha Fiscal e da Ponta da Armação, que possuem RRNN com altitudes ortométricas conhecidas. Foram considerados para este cálculo, dados (observações maregráficas e altitudes elipsoidais) amostrados a uma taxa de 10 minutos, em função da resolução gráfica dos maregramas.

TABELA 18 - ALTURAS DAS ANTENAS GPS RTK / RTG

Receptor	Dia	Altura ⁽³⁾ (m)	2 σ (m)	Amostras	Período (hh:mm:ss)
RTK Trimble 7400	26JUL	7,888	0,0366	11	18:50:00 às 20:39:00
	27JUL	7,748	0,0516	19	17:20:00 às 20:29:30
	28JUL	7,849	0,0310	24	17:38:00 às 21:38:30
	28JUL ⁽¹⁾	7,699	0,0497	47	08:45:00 às 16:37:30
RTG C-Nav 2050M	26JUL	8,102	0,4856	82	18:46:00 às 08:23:00
	27JUL	8,070	0,5730	84	
	28JUL	8,165	0,2718	90	17:53:00 às 09:09:00
	28JUL ⁽¹⁾	8,174	0,2567	47	08:45:00 às 16:36:00
RTK FlexPak	26JUL	0,311	0,0142	4	18:50:00 às 19:30:00
	27JUL	0,160	0,1515	82	17:30:00 às 07:10:00
	28JUL	SOLUÇÕES RTK FIXAS INSUFICIENTES PARA ANÁLISE ⁽²⁾			
	28JUL ⁽¹⁾	0,076	0,0667	46	08:50:00 às 16:30:00

NOTA: Estação maregráfica de referência da Ponta da Armação

(1) Dados observados durante o período da sondagem batimétrica

(2) Fortes ventos ao final do dia 28 de julho deslocaram a estação de referência FlexPak

(3) Alturas referidas a linha d'água média da embarcação do período analisado (GOLDAN, 1994)

As alturas correspondem às médias das amostras no período observado. O sistema RTK Trimble apresentou menos amostras devido a problemas de gravação das *strings* NMEA 0183, que era interrompida aleatoriamente depois de determinado volume de dados adquiridos. As menores alturas das antenas nos sistemas RTK Trimble e FlexPak, durante o período de sondagem do dia 28 de julho de 2006, justificam-se pelo aumento de calado, em função da maior quantidade de pessoal e material embarcado durante as operações no mar. As alturas da antena do sistema RTG C-Nav não apresentam uma certa coerência quando comparadas com observações baseadas em terra, possivelmente devido a não aplicação de correções de marés terrestres às suas soluções de posição. Este efeito será novamente analisado na seção 4.4.3.

Não foram calculadas as alturas das antenas dos receptores Leica GX1230 e Astech Z-XII porque estes equipamentos não foram empregados para o cálculo das correções de marés GPS.

3.1.5 Aferição dos marégrafos

Para validação das correções de marés (T_2) (seção 2.2.2) pelas altitudes elipsoidais, durante o deslocamento da embarcação de sondagem, deve ser realizado um teste estático, que consiste na comparação entre as correções T_2 e as convencionais (T_1). Este teste visa também verificar a existência de possíveis erros sistemáticos antes da realização dos levantamentos no mar. A análise é realizada através do processamento dos dados RTK coletados a partir de antenas GPS instaladas a bordo da embarcação de sondagem, durante períodos de 25 horas atracada próxima às estações maregráficas.

Para se garantir informações maregráficas confiáveis, antes da coleta das observações de maré, foi verificada a correta operação dos marégrafos, através do teste de *Van de Castele*, que consiste na comparação dos registros do marégrafo com as leituras da régua, ao longo de um ciclo completo de maré. Estas leituras produzem diagramas (FIGURA 29), que de acordo com a sua forma, identificam falhas de operação do marégrafo. No caso de um marégrafo perfeito a diferença entre ambas as leituras permanecerá constante ao longo do tempo (IOC,1985).

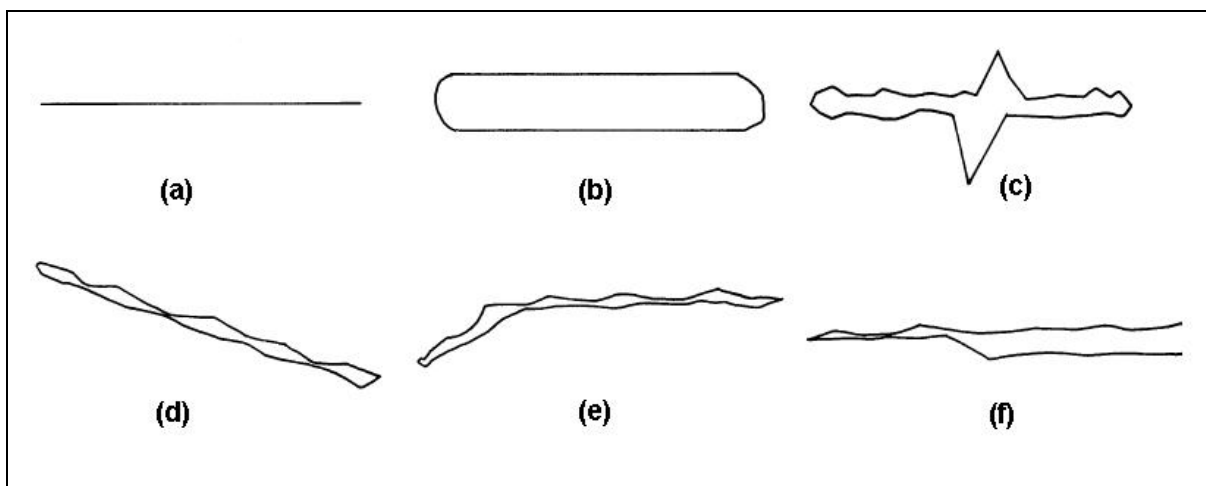


FIGURA 29 - DIAGRAMAS RESULTANTES DO TESTE DE VAN DE CASTEELE
FONTE: Adaptado de IOC (1985, p.28)

A interpretação dos diagramas apresentados na FIGURA 29 é dada por (IOC, 1985, p.28):

- (a) marégrafo perfeito;
- (b) atraso no tempo de resposta do marégrafo provocado por desgastes no sistema que aciona a pena do registrador;

- (c) atrito no mecanismo de medição ou do flutuador no tubo;
- (d) erro de escala, gerado por incorreções do diâmetro do fio do flutuador, da relação entre as polias do flutuador e de acionamento da pena do registrador ou do próprio papel registrador;
- (e) erro de escala parcial sobre parte do registro; e
- (f) deslizamentos nos mecanismos do marégrafo.

Este teste também permite identificar a relação entre os diferentes referenciais instrumentais (“zeros” do marégrafo e da régua), evidenciada pelas diferenças de leituras (DALAZOANA, 2006, p.62).

Foram realizados testes a partir das leituras (marégrafo e régua) coletadas no período entre as 08:00 horas do dia 17 de julho às 08:00 do dia seguinte, a uma taxa de 10 minutos, nas estações maregráficas da Ilha Fiscal e Ponta da Armação, cujos resultados são mostrados nos gráficos das FIGURAS 30 e 31.

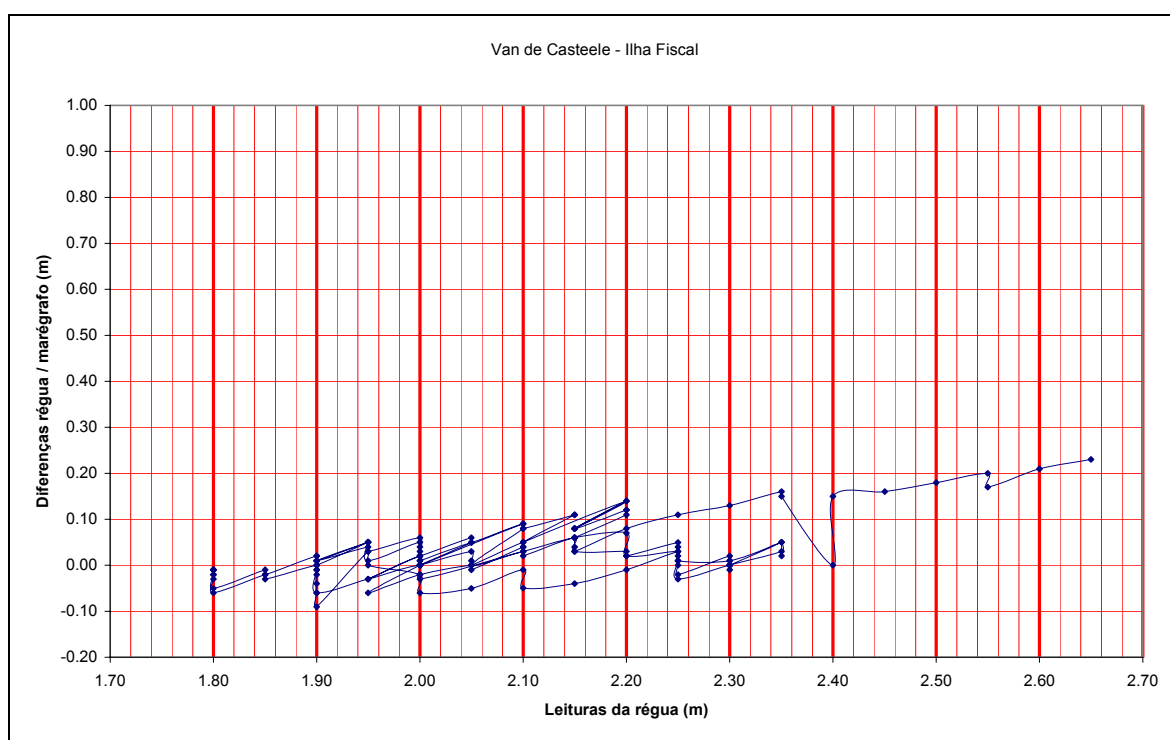


FIGURA 30 - RESULTADOS DO TESTE DE VAN DE CASTEELE - ILHA FISCAL - 17/07/06

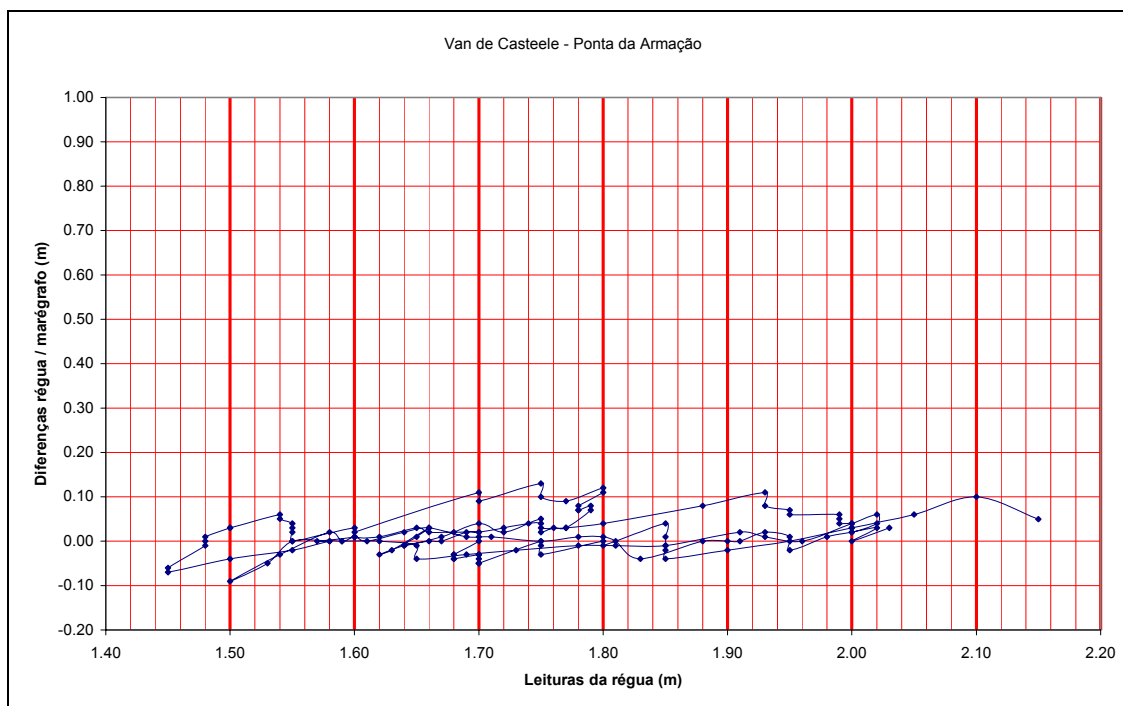


FIGURA 31- RESULTADOS DO TESTE DE VAN DE CASTEELE - PONTA DA ARMAÇÃO - 17/07/06

Apesar das condições meteorológicas favoráveis, as observações foram realizadas em um período de quadratura, o que não permitiu uma boa definição da maré, já que a região possui fortes desigualdades diurnas.

Como pode ser observado nos gráficos das FIGURAS 30 e 31, o marégrafo da Ponta da Armação demonstrou uma sensível diferença de qualidade em suas observações, com erros médios em torno de zero, aproximando-se do gráfico (a) da FIGURA 29. O marégrafo da Ilha Fiscal apresentou erros de aproximadamente 20 cm a partir das leituras de 2,40 m, sugerindo um pequeno erro de escala parcial, de acordo com o gráfico (e) da FIGURA 29. Desta forma o marégrafo da Ponta da Armação foi adotado como referência para as reduções batimétricas e comparações decorrentes, neste trabalho, reforçado pelo fato da embarcação permanecer atracada na CNPA, favorecendo as comparações para análise das marés RTK, a partir das observações do período noturno.

3.1.6 Teste de Latência

Uma das causas do erro de sincronismo entre os sistemas batimétricos e de posicionamento é a latência, que é a diferença de tempo entre o recebimento dos dados e sua disponibilização (*output*) para o programa de aquisição automática, em função do tempo de processamento interno de cada equipamento. A latência entre o

sistema de posicionamento e o ecobatímetro é um valor tipicamente positivo (HYPACK, 2005, p.2-141), e acarreta em um deslocamento das sondagens ao longo da linha percorrida, em função da diferença de tempo entre o instante da profundidade observada e a saída da informação de posição, após o processamento pelo receptor GPS (FIGURA 32) . É portanto, diretamente proporcional à velocidade da embarcação de sondagem, podendo chegar a diferenças de até 13 metros (USACE, 2004, p.9-38).

A correção da latência para sistemas acústicos monofeixe é realizada através do denominado Teste de Latência, que visa determinar a diferença entre o sistema de posicionamento e o ecobatímetro. Sistemas multifeixe utilizam o chamado *Patch Test*, empregado para o alinhamento entre sensores, principalmente entre os sistemas inercial e acústico (CLARKE,2003).

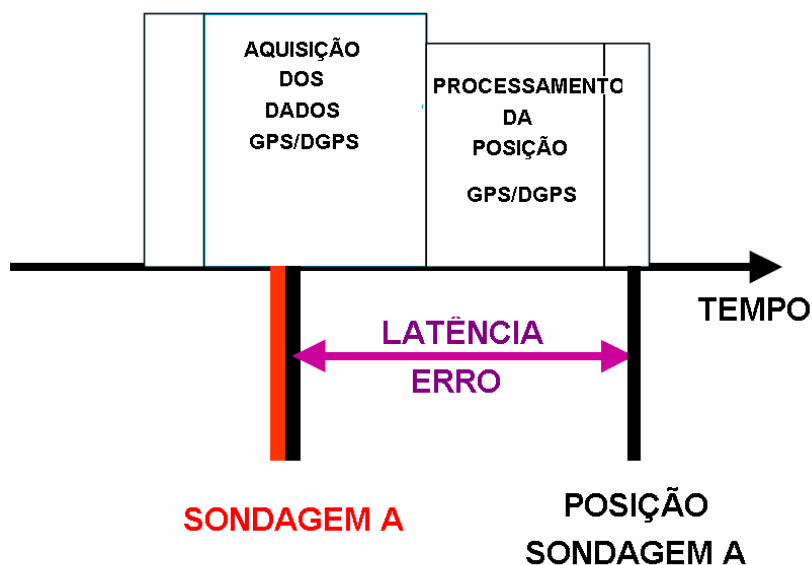


FIGURA 32 - LATÊNCIA ENTRE GPS/DGPS - ECOBATÍMETRO
FONTE: Adaptado de USACE (2004)

O tempo de latência pode ser calculado medindo-se os deslocamentos das sondagens ao longo de um par de linhas coincidentes, percorridas com diferentes velocidades, sobre um gradiente de declividade do fundo acentuado, ou sobre alguma feição submersa proeminente, em períodos de estofio de maré, com mar calmo (HYPACK,2005,p.2-142; USACE, 2004,p.11-19) .

A equação que define o tempo de latência é dada por:

$$TD = \frac{d_a}{v_h - v_l} \quad (3.7)$$

onde:

TD - tempo de latência (segundos);

d_a - deslocamento ao longo da linha (metros);

v_h - máxima velocidade (m/s) da embarcação de sondagem; e

v_l - mínima velocidade (m/s) da embarcação de sondagem.

Os testes de latência foram realizados no dia 27 de julho próximo a ilha da Lage, na Baía de Guanabara, por apresentar uma declividade significativa de aproximadamente 15%. A embarcação de sondagem percorreu linhas no sentido N-S e E-W sobre a área pré-determinada, sendo empregadas para o cálculo da latência apenas as linhas E-W, por apresentarem melhor qualidade dos dados batimétricos. Durante as linhas N-S o ecobatímetro não acompanhou adequadamente as rápidas variações de profundidade. A FIGURA 33 (unidades em metros) apresenta a seção vertical dos perfis E-W percorridos.

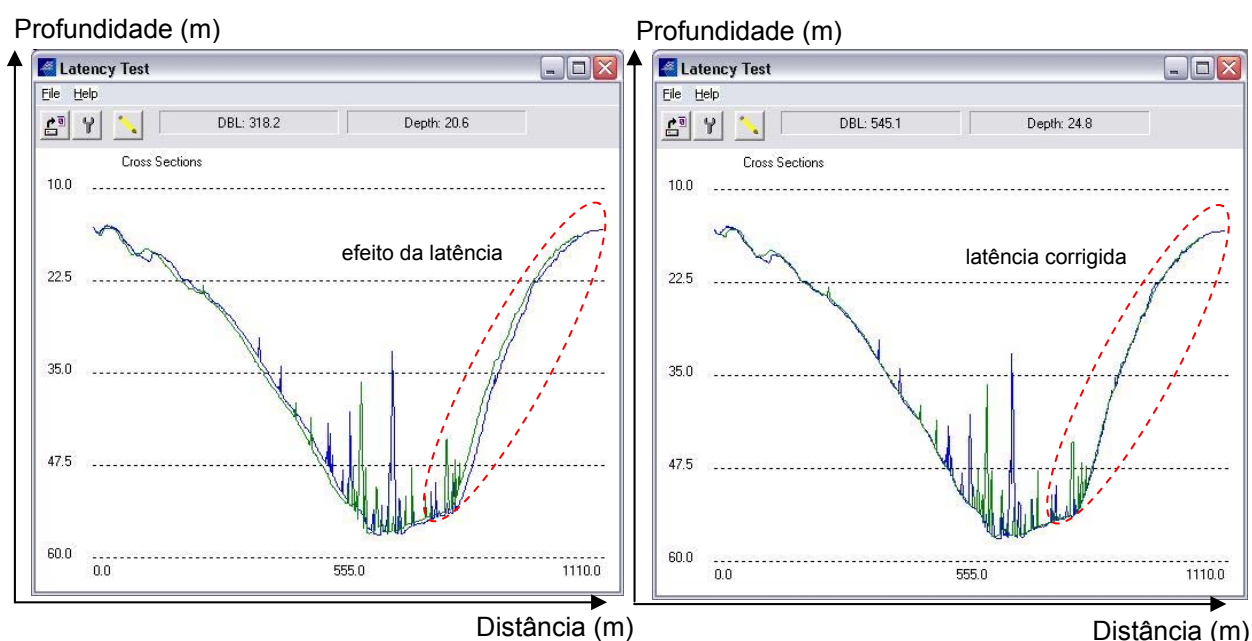


FIGURA 33 - TESTE DE LATÊNCIA ENTRE O RTK TRIMBLE 7400 E ECOBATÍMETRO HYDROTRAC

O efeito da latência pode ser notado na FIGURA 33 (esquerda) através da não coincidência dos perfis (em destaque pela linha pontilhada) sobre uma alteração

brusca de profundidade. Após o processamento dos perfis é possível quantificar a latência e corrigir a discrepância, conforme a FIGURA 33 (direita).

As latências foram calculadas pelo programa de aquisição automática HYPACK versão 4.3a GOLD, para os receptores integrados, através do mesmo programa, ao sinal do ecobatímetro monofeixe portátil HYDROTRAC, e são apresentadas na Tabela 19, juntamente com os *offsets* horizontais (FIGURA 27), tomados em relação ao transdutor do ecobatímetro.

TABELA 19 - *OFFSETS* DOS RECEPTORES INTEGRADOS AO HYPACK

<i>Offsets</i>	Receptores		
	RTK Trimble 7400	RTK FlexPak	RTG C-Nav 2050M
<i>Starboard</i>	-4,431 m	-6,095 m	-5,059 m
<i>Forward</i>	4,92 m	10,657 m	4,92 m
Latência	0,3 seg	0,90 seg	0,38 seg

NOTA: O *offset* horizontal *Starboard* é medido no sentido do eixo “y” do sistema cartesiano de referência da embarcação (FIGURA 11), positivo para boreste. O *offset Forward* é medido ao longo do eixo “x”, positivo para vante da embarcação.

Verifica-se da Tabela 19 que a não consideração do efeito da latência entre os receptores GPS e o ecobatímetro pode introduzir erros de até 1,8 m, para o sistema RTK FlexPak, considerando uma velocidade média de aproximadamente 3 m/s da embarcação de sondagem.

3.2 EXECUÇÃO

A execução compreende o levantamento hidrográfico na área estabelecida, cumprindo os perfis planejados e de acordo com os demais parâmetros de planejamento determinados na seção 3.1, visando a coleta dos dados necessários para a análise da metodologia.

Para gerar uma maior redundância de dados, facilitando sua posterior análise, foram realizados dois levantamentos batimétricos, dias 26 e 28 de julho de 2006, período de sizígia, para uma melhor observação do comportamento da maré, minimizando os efeitos das desigualdades diurnas. Os perfis foram percorridos pela lancha “SO Oliveira” a uma velocidade média de 6 nós (aproximadamente 3 m/s), tendo cada levantamento uma duração média de 8 horas, suficiente para a definição da evolução da maré entre uma baixamar e uma preamar. A FIGURA 34 mostra a distribuição dos computadores e equipamentos a bordo da lancha “SO Oliveira”.

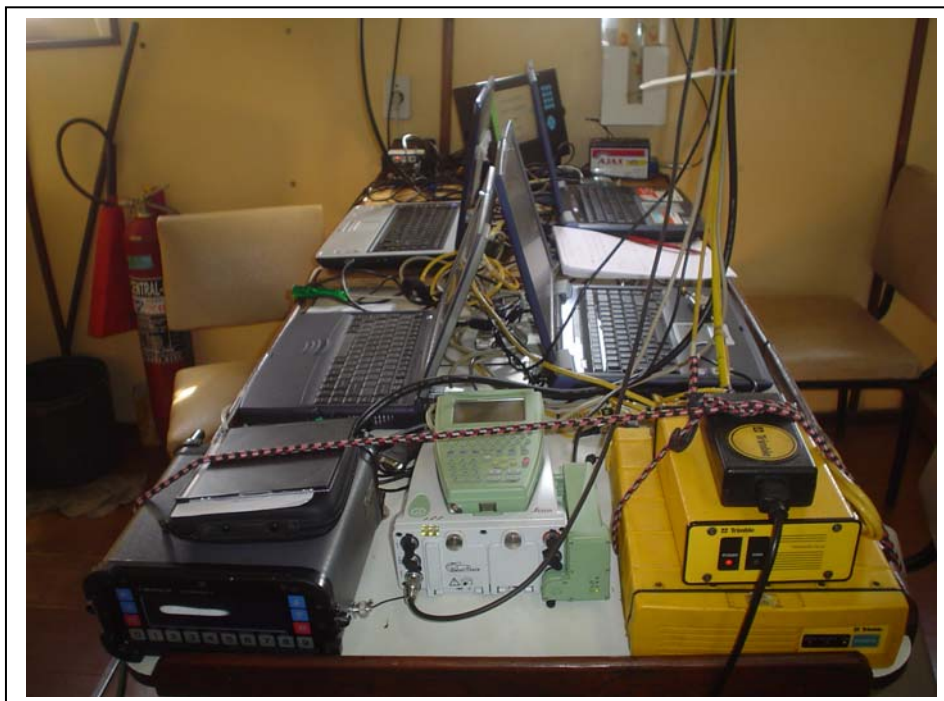


FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO DOS COMPUTADORES E EQUIPAMENTOS A BORDO

Foi empregado o programa de aquisição automática HYPACK para integração dos dados de posição, oriundos dos receptores Trimble 7400, FlexPak e C-Nav 2050M, aos dados batimétricos do ecobatímetro monofeixe portátil HYDROTRAC e ao sensor inercial TSS335B. A escolha destes receptores GPS visou à análise das correções T_2 de diferentes equipamentos RTK, além da inédita aplicação do sistema RTG em Levantamentos Hidrográficos no Brasil. O programa HYPACK possibilitou também a correção dos *offsets* entre os equipamentos, sobretudo o cálculo da latência. Como visto na Tabela 19, caso não fosse corrigida a latência, teriam sido obtidos erros de até 1,80 m (RTK FlexPak) para as sondagens. O sistema RTK Leica GPS1200 foi empregado apenas para gravação de observações de dupla frequência GPS para pós-processamento, uma vez que, na época do levantamento, não estava disponível o cabo de dados para conexão com o computador. A FIGURA 35 apresenta um diagrama da conexão dos equipamentos.

Devido a baixa precisão vertical do sistema DGPS, os receptores Trimble NT200D e Ashtech Z-XII foram empregados apenas para análise de suas acurácias horizontais. O receptor Ashtech Z-XII foi empregado no dia 28 de julho para gravação de observações GPS de dupla frequência, a fim de se gerar as posições padrão, a partir do pós-processamento dos dados. Estas posições padrão permitem

a análise da acurácia de cada um dos sistemas de posicionamento empregado. A taxa de aquisição dos dados foi de 1 segundo, sendo a sincronização do programa de aquisição automática dada pelas mensagens NMEA ZDA (Tabela 11 da seção 2.4.1.3) dos receptores GPS.

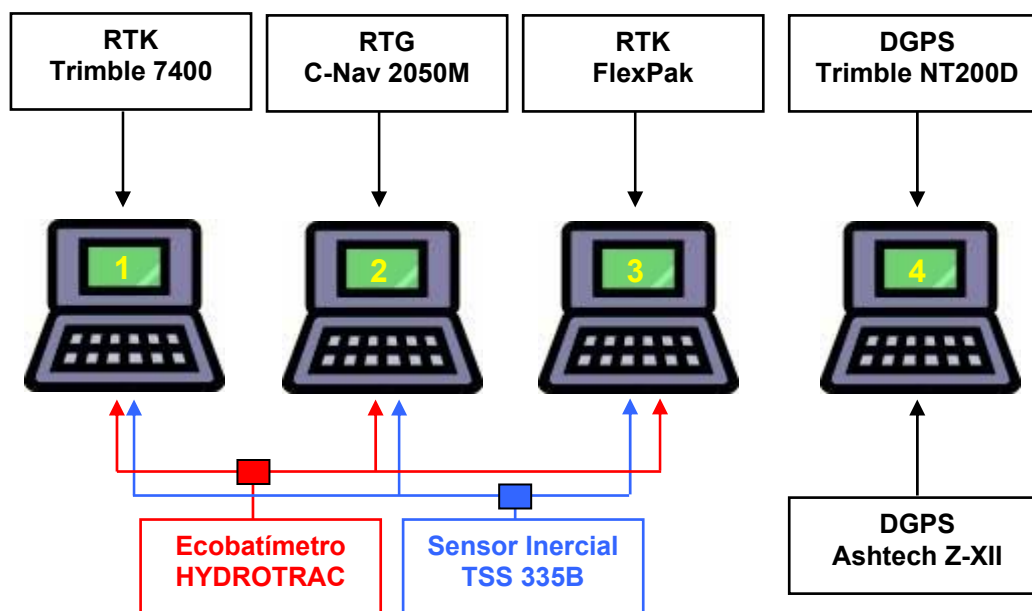


FIGURA 35 - DIAGRAMA DE CONEXÃO DOS EQUIPAMENTOS

Durante os levantamentos hidrográficos foram coletados dados sob a forma de arquivos brutos (*.RAW), mensagens NMEA contendo as posições DGPS, arquivos RINEX de observações brutas GPS, maregramas, ecogramas e perfis verticais de velocidade do som.

3.2.1 Arquivos brutos (*.RAW)

Formato dos arquivos gerados pelo programa HYPACK, contendo informações de posição, batimetria e atitude da embarcação de sondagem durante o seu deslocamento. Possuem formato ASCII, conforme mostrado na FIGURA 36, o que torna possível seu processamento por outros programas.

Cada arquivo corresponde a uma linha de sondagem. Por exemplo, o arquivo 2006SO2090850_21.RAW corresponde à linha 21, iniciada às 08h50 do dia 209 (28 de julho) do ano de 2006.

```

FTP NEW 2
VER 4.3a.7.1
INF "Cláudia e Alexandre" "SO Oliveira" "Baia de Guanabara" "Ponta da Armacao" -1.610000 0.000000 0.000000
FIL "" "C:\Hypack\Projects\Baia de Guanabara\Linhas EW.lnw"
ELL WGS-84 6378137.000 298.257223563
PRO TME xxxxx -45.000000 0.999600 0.000000 0.000000 0.000000 500000.0000 10000000.0000
DTM 0.00 0.00 0.00 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
HVV 1.00000000000 1.00000000000
TND 08:50:25 07/28/2006 180
DEV 0 16 "hydrotrack" 512 c:\hypack\devices\ECHOTRAC.dll 2.3
OFF 0 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
DEV 1 33280 "TSS" 512 c:\hypack\devices\TSS320.dll 4.3.1.1
OFF 1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
DEV 2 485 "RTK TRIMBLE 1" 49156 c:\hypack\devices\kinematic.dll 3.3
OFF 2 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
LIN 2
PTS 691000.00 7468750.00
PTS 688650.00 7468750.00
LBP 691000.00 7468750.00
LNN 21
EOL
EOH
EC1 0 31823.628 18.420
HCP 1 31823.626 0.000 0.380 1.410
POS 2 31824.000 690021.158 7468751.757
QUA 2 31824.000 13 5.700 4.300 5.000 2.000 0.603 0.446 0.642 68893293.134 68893293.087 0.000 0.000 289.000 0.000
RAW 2 31824.000 4 -225270.12968 -430886.10076 0.64300 115024.00000
MSG 2 31824.014 $PTNL,GGK,115024.00,072806,2252.70129682,S,04308.86100761,W,2,05,4.3,EHT0.643,M*7C
MSG 2 31824.058 $PGGST,115024.0,0.012,0.642,0.387,295.5,0.603,0.446,1.008*6A
EC1 0 31824.128 18.420
HCP 1 31824.096 -0.030 -0.420 1.440
MSG 2 31824.091 $GPZDA,115024.09,28,07,2006,00,00*65
EC1 0 31824.628 18.440
HCP 1 31824.611 -0.060 -1.320 1.440
POS 2 31825.000 690017.764 7468751.272
QUA 2 31825.000 13 5.700 4.300 5.000 2.000 0.589 0.441 0.628 68893293.134 68893293.087 0.000 0.000 289.000 0.000
RAW 2 31825.000 4 -225270.15827 -430886.29881 0.47500 115025.00000
MSG 2 31825.011 $PTNL,GGK,115025.00,072806,2252.70158269,S,04308.86298812,W,2,05,4.3,EHT0.475,M*74

```

FIGURA 36 - TRECHO DO ARQUIVO HYPACK DE SONDAGEM 2006SO2090850_21.RAW

Após o cabeçalho do arquivo, seguem as linhas com os dados de cada equipamento conectado e configurado no programa. Estas linhas de dados são iniciadas por um código alfanumérico de três dígitos que identificam um determinado tipo de informação. Segue-se o número do equipamento que gerou aquela informação. No exemplo da FIGURA 36, o número 1 corresponde ao sensor inercial TSS 335B. A seguir um número, denominado *time tag*, empregado para sincronia dos dados, e finalmente a informação do equipamento. As principais mensagens utilizadas neste trabalho foram EC1 (sondagem), HCP (*heave, pitch e roll*), POS (posições WGS-84 G1150 em grid UTM Sul, zona 23) e MSG para gravação das mensagens NMEA habilitadas em cada receptor GPS, conforme a Tabela 20. Maiores detalhes sobre os arquivos brutos *.RAW podem ser vistos no manual do programa HYPACK versão 4.3a GOLD.

As mensagens NMEA (seção 2.4.1.3) fornecem informações como latitude e longitude WGS-84 G1150, altitude elipsoidal, hora UTC, VDOP, HDOP, PDOP, desvios padrão das coordenadas, idade das correções diferenciais e qualidade das soluções (GPS, DGPS, RTK *Fixed*, RTK *Float*), entre outras. A Tabela 20 apresenta as mensagens NMEA habilitadas em cada receptor empregado nesta pesquisa.

Maiores detalhes sobre as mensagens NMEA podem ser obtidos nos manuais dos receptores.

TABELA 20 - MENSAGENS NMEA HABILITADAS NOS RECEPTORES GPS

Receptor	Mensagens NMEA
Trimble 7400	\$PTNL,GGK - \$GPGST - \$GPZDA
FlexPak	\$GPGGA - \$GPZDA
C-Nav 2050M	\$GPGGA - \$GPGST - \$GPGSA - \$GPZDA

A Tabela 21 apresenta os arquivos de linhas de sondagem de cada receptor.

Os dados foram coletados a partir de três computadores tipo *notebooks*, identificados por números de 1 a 3, dedicados aos receptores de interesse na pesquisa: Trimble 7400 (1), FlexPak (2) e C-Nav 2050M (3), totalizando, para cada computador, 66 arquivos de linhas de sondagem, nos dias 26 e 28 de julho de 2006, e mais 9 arquivos de linhas para teste de latência, no dia 27 de julho.

TABELA 21 - ARQUIVOS DE LINHAS DE SONDAAGEM

Comp.	Dia	Período	Receptor	Dir.	Linhas de Sondagem
1	26	08:21 às 09:12	C-Nav 2050M	EW	2006SO2070821_21 a 2006SO2070905_18
		11:39 às 12:45	FlexPak	EW	2006PO2071139_9 a 2006PO2071233_5
		13:00 às 17:04	FlexPak	NS	2006PO2071300_16 a 2006PO2071653_1
	27	09:52 às 10:38	FlexPak	NS	2006PO2080952_16 a 2006PO2081029_13
		10:48 às 11:30	FlexPak	EW	2006PO2081048_12 a 2006PO2081125_8
	28	08:45 às 12:46	FlexPak	NS	2006PO2090845_21 a 2006PO2091233_5
		12:56 às 16:38	FlexPak	EW	2006PO2091256_16 a 2006PO2091625_1
2	26	08:21 às 09:19	FlexPak	EW	2006SO2070821_21 a 2006SO2070905_18
		09:24 às 12:45	C-Nav 2050M	EW	2006SO2070924_17 a 2006SO2071233_5
		13:00 às 17:04	C-Nav 2050M	NS	2006SO2071300_16 a 2006SO2071653_1
	27	09:52 às 10:38	C-Nav 2050M	NS	2006SO2080952_1 a 2006SO2081029_1
		10:47 às 11:30	C-Nav 2050M	EW	2006SO2081047_1 a 2006SO2081125_1
	28	08:45 às 12:46	C-Nav 2050M	NS	2006SO2090845_21 a 2006SO2091233_5
		12:56 às 16:38	C-Nav 2050M	EW	2006SO2091256_16 a 2006SO2091625_1
3	26	08:21 às 12:45	Trimble 7400	EW	2006SO2070821_21 a 2006SO2071233_5
		13:00 às 17:04	Trimble 7400	NS	2006SO2071300_16 a 2006SO2071653_1
	27	09:52 às 10:38	Trimble 7400	NS	2006SO2080952_16 a 2006SO2081029_13
		10:47 às 11:30	Trimble 7400	EW	2006SO2081047_12 a 2006SO2081125_8
	28	08:44 às 12:46	Trimble 7400	NS	2006SO2090844_21 a 2006SO2091234_5
		12:56 às 16:38	Trimble 7400	EW	2006SO2091256_16 a 2006SO2091625_1

NOTAS: Os três computadores também receberam os dados do ecobatímetro HYDROTRAC e sensor inercial TSS 335B através de um divisor de sinal RS232 (FIGURA 35).

Os dias 26 e 28 de julho referem-se ao período de sondagem regular, enquanto as linhas do dia 27 de julho foram realizadas para o Teste de Latência.

As direções das linhas de sondagem seguiram orientação NS (Norte-Sul) e EW (Leste-Oeste).

No primeiro dia de sondagem, devido a um problema no computador 1, o receptor RTG C-Nav 2050M passou a operar com o computador 2, já que foi considerada mais relevante a coleta dos dados RTG, por se tratar da sua primeira utilização em levantamentos hidrográficos pela Marinha. Já o receptor RTK FlexPak passou a operar a partir do computador 1, após o seu reparo.

3.2.2 Arquivos NMEA DGPS

Apesar do método DGPS, com correções diferenciais baseadas no código da portadora, ou código suavizado pela fase da onda portadora, não se prestar para as reduções batimétricas GPS, por não fornecer a precisão vertical necessária, ainda é o método de posicionamento horizontal mais empregado nos levantamentos hidrográficos realizados pela Marinha. Desta forma, os dois receptores DGPS (Ashtech Z-XII e Trimble NT200D) não foram integrados ao programa HYPACK, porém um quarto computador gravou suas mensagens NMEA de posição (GPGLGA) para posterior análise de sua acurácia horizontal. A Tabela 22 apresenta os períodos de dados DGPS coletados pelo computador 4.

TABELA 22 - PERÍODOS DAS MENSAGENS NMEA DOS RECEPTORES DGPS - 26/07/06

Dia	Receptor	Estação de Referência	Período
26	Trimble NT200D	RF da Ilha Rasa	07:15 às 09:59
			11:21 às 17:03
	Ashtech Z-XII	Guarita do DHN 20	07:15 às 08:38
			09:09 às 12:53
			13:23 às 15:08

NOTA: As interrupções ocorreram por causas diversas. As principais foram problemas na recepção dos dados dos receptores DGPS e paradas na coleta para descarga dos dados brutos do receptor Ashtech Z-XII.

3.2.3 Dados brutos GPS

A fim de permitir uma estimativa da acurácia dos sistemas de posicionamento empregados (RTK, RTG e DGPS) foram coletadas observações de dupla frequência por meio dos receptores geodésicos Ashtech Z-XII e Leica GPS1200 visando a geração de coordenadas “padrão” obtidas com o pós-processamento dos dados brutos. Neste caso realizou-se um posicionamento relativo cinemático.

Durante a sondagem do dia 26 de julho, o receptor Ashtech Z-XII foi empregado no sistema DGPS, conforme a Tabela 22, gravando simultaneamente observações brutas GPS, a uma taxa de 3 segundos. Por limitações da memória interna do equipamento, não foi possível a gravação contínua dos dados durante todo o período da sondagem. Desta forma, optou-se por empregar o computador 4, durante a sondagem do dia 28 de julho de 2006, para gravação contínua das observações GPS brutas do receptor Ashtech Z-XII, através do módulo *Datalogger* do programa Ashtech Solutions.

3.2.4 Batimetria

As sondagens foram adquiridas pelo ecobatímetro monofeixe portátil ODOM HYDROTRAC versão 2.12, instalado pela borda da embarcação, e gravadas nos arquivos brutos do programa HYPACK (*.RAW), através das mensagens EC1, além dos registros em ecograma (FIGURA 37) para posterior análise e tratamento dos dados.

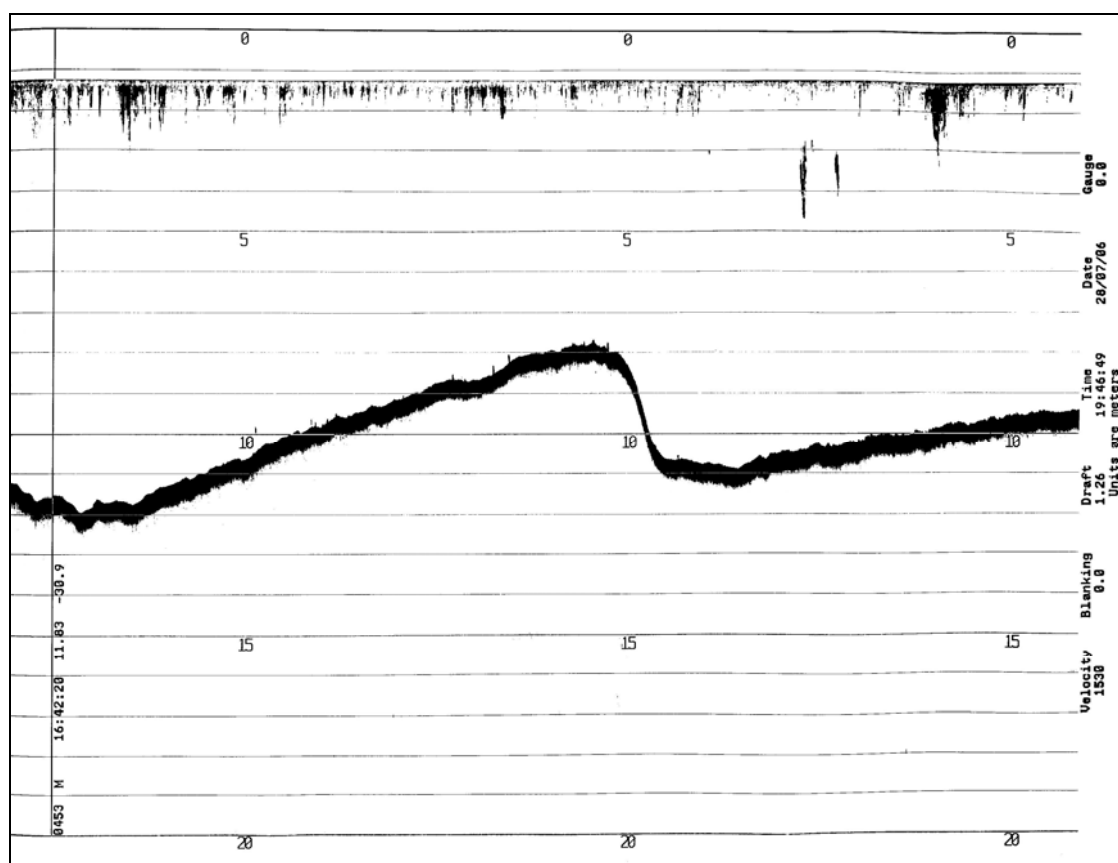


FIGURA 37 - SEÇÃO DE ECOGRAMA DO ECOBATÍMETRO HYDROTRAC - DIA 28/07/06

O valor de calado foi determinado a partir de uma trena milimétrica, tomando-se como referência a linha d'água da embarcação. Entretanto esta versão do *firmware* do equipamento não permite a inserção do índice de correção instrumental (κ), apresentado na expressão (2.37) da profundidade reduzida, por ocasião da rotina de calibração. Este índice é um valor constante para o conjunto transdutor mais ecobatímetro, e corrige as variações de calado oriundas de atrasos elétricos e mecânicos inerentes ao sistema de medida (USACE, 2004, p.9-2). Estas variações são mais facilmente percebidas quando operando com transdutores que incorporam elementos de dupla frequência. Caso não seja corrigido o valor do índice para cada frequência os calados medidos variarão substancialmente entre si (ODOM HYDROGRAPHIC SYSTEMS, 2005, p. 27).

Além disso, a referência para medida da profundidade de imersão do transdutor deveria ser a mesma usada para o cálculo das alturas das antenas GPS. Por esta razão o calado do transdutor foi medido com relação à linha d'água da embarcação, que vem a ser a mesma referência de cálculo da altura da antena GPS do método de GOLDAN (1994). Na verdade este procedimento não é o ideal, sendo recomendada a materialização de um referencial vertical fixo, a partir de métodos topográficos com a embarcação docada.

3.2.5 Informações de Atitude

Os ângulos de *pitch* e *roll* (FIGURA 11), e *heave* (FIGURA 17) foram fornecidos pelo sensor inercial TSS 335B. O equipamento possui três acelerômetros lineares e três sensores de variações angulares, que percebem os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*. Entretanto estes sensores percebem apenas variações relativas de ângulos. Para se obter as medidas absolutas de *roll* e *pitch* são necessárias referências horizontais e verticais fornecidas pelos acelerômetros lineares, através do cálculo da aceleração resultante da soma das respostas de cada um dos três acelerômetros. Já a informação de *heave* é obtida a partir de um algoritmo de dupla integração das respostas do conjunto de acelerômetros. O equipamento fornece medidas de *heave* de até 10 metros, com uma resolução de 1cm, e ângulos de *roll* e *pitch* com amplitudes de até 50°, com uma resolução de 0,01° (TSS UK Ltd, 1994).

Para este trabalho eram mais significativas as medidas de *roll* e *pitch*, já que o efeito *heave* tende a ser anulado pelas reduções batimétricas GPS. A instalação foi

feita o mais próxima possível da linha d'água, sobre o convés principal da embarcação de sondagem. O nivelamento do equipamento é realizado de forma automática através do software de configuração.

Em função das boas condições de mar durante os levantamentos os ângulos de atitude sofreram pouca variação. Os ângulos de balanço (*roll*) denotam uma inclinação sistemática da embarcação de aproximadamente $1,4^\circ$, permanecendo abaixo deste valor durante 95% do tempo do levantamento. Este valor não compromete a medida de profundidade uma vez que é menor que a metade da largura do feixe acústico. Os ângulos de caturro (*pitch*) apresentaram também valores pouco significativos, variando aproximadamente $1,1^\circ$ em torno de uma média de $-0,34^\circ$. O efeito *heave* medido variou dentro de uma faixa de 10 cm em torno de uma posição de equilíbrio da embarcação (média $-0,003$ m), conforme pode ser observado no gráfico da FIGURA 38.

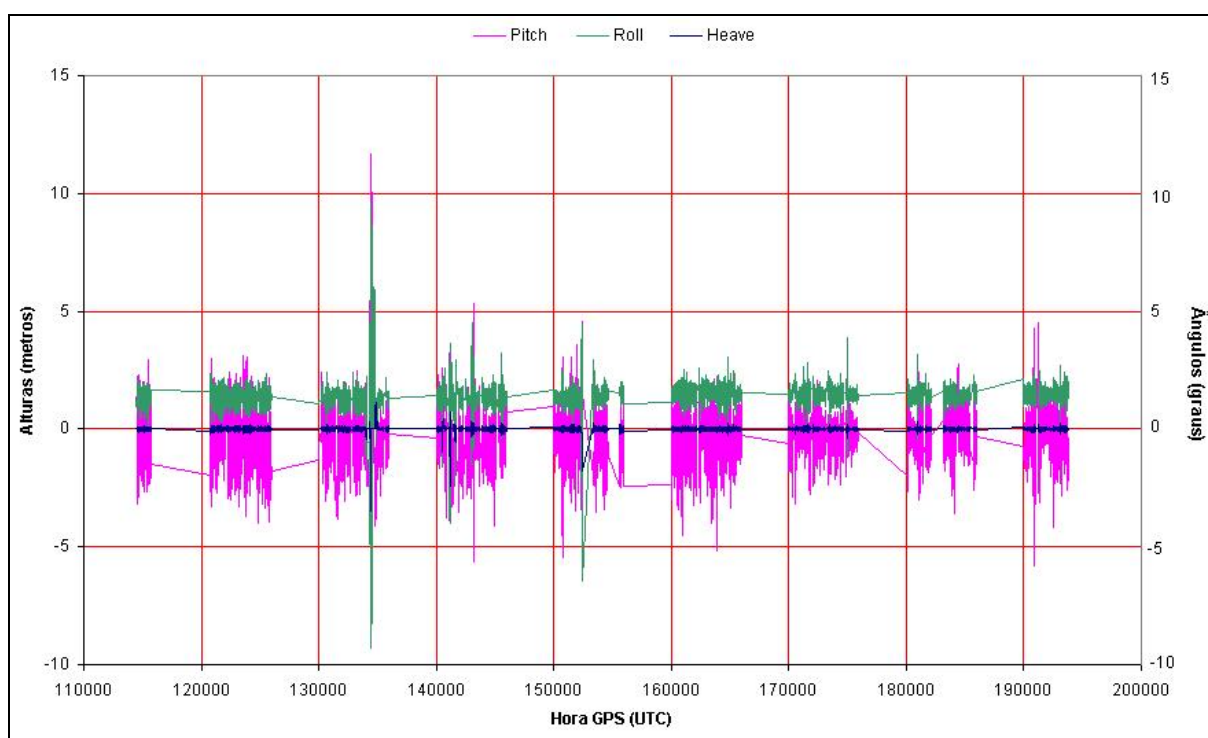


FIGURA 38 - VARIAÇÕES DE ATITUDE (*HEAVE*, *PITCH* E *ROLL*) DURANTE O LEVANTAMENTO DIA 28/07/06

Os vazios de dados observados no gráfico ocorreram durante as mudanças de linha de sondagem, quando os dados não foram gravados para evitar a introdução de erros grosseiros gerados pelas guinadas da embarcação.

3.2.6 Observações Maregráficas

As observações maregráficas foram realizadas a partir das estações maregráficas da Ilha Fiscal e Ponta da Armação, equipadas com marégrafos HIDROLOGIA modelo LNG.09D. e HIDROCLIMA modelo LVH, respectivamente. Estas observações foram empregadas para o cálculo das alturas das antenas GPS, processamento das reduções batimétricas pelo método tradicional, que serviu de padrão para a comparação da metodologia de redução GPS, e para a própria avaliação de qualidade da maré observada pelos receptores GPS, nas situações da embarcação atracada e durante seu deslocamento ao longo do levantamento hidrográfico.

Os maregramas foram comparados com a maré prevista, a partir das constantes harmônicas determinadas pelo período padrão das fichas de cada estação, visando a verificação de possíveis incorreções de digitalização, assim como a ocorrência de fenômenos meteorológicos significativos que pudessem alterar o comportamento da maré. A FIGURA 39 representa a comparação entre as marés observada e prevista para a Estação Maregráfica da Ponta da Armação das 18h00 do dia 26 de julho às 00h00 do dia 29 de julho de 2006.

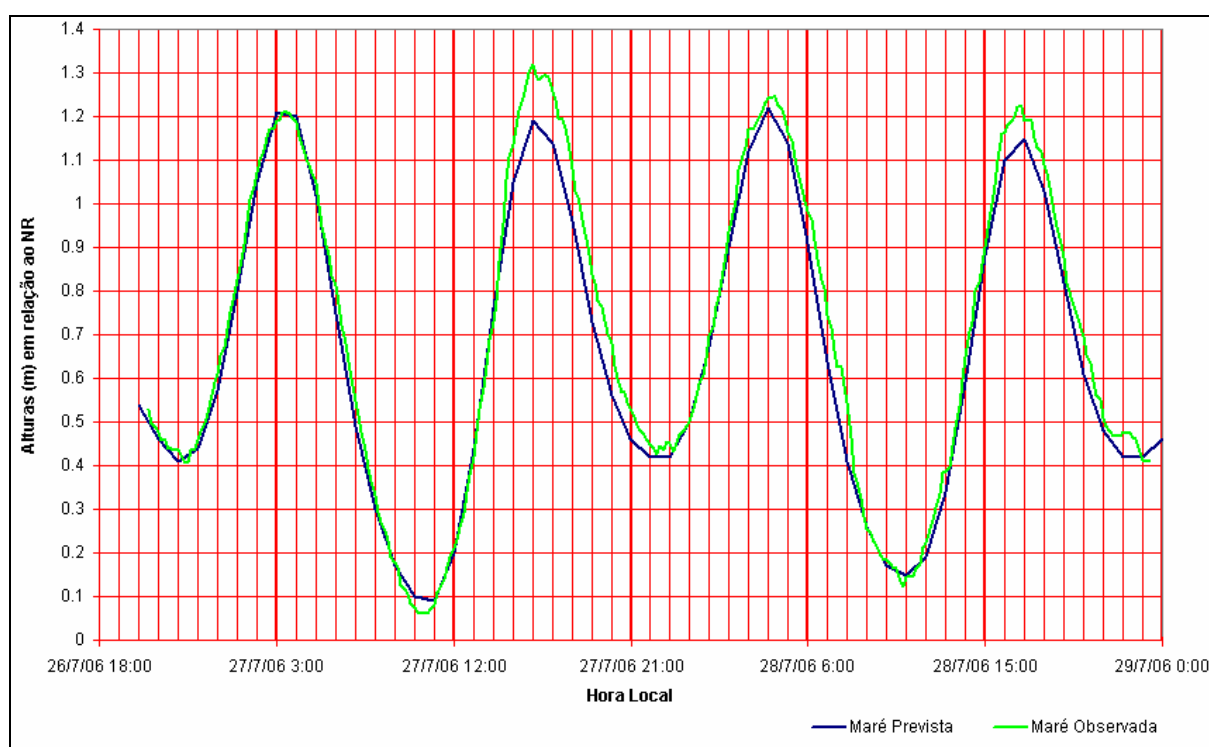


FIGURA 39 - MARÉ PREVISTA X MARÉ OBSERVADA NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO - PERÍODO 26/07/06 A 29/07/06

A comparação com a maré prevista permite identificar possíveis efeitos meteorológicos. Durante o período do levantamento do dia 28 de julho não ocorrem discrepâncias significativas entre as marés prevista e observada, dadas as boas condições climáticas. Próximo ao término do levantamento, às 16h30, ocorrem diferenças de aproximadamente 10 cm, possivelmente em decorrência do aumento dos ventos no final do período decorrente da entrada de uma frente fria no dia 29 de julho.

3.2.7 Velocidade de propagação do som na água

O cálculo da velocidade do som é empregado para calibração do ecobatímetro, que consiste de rotinas para ajuste do equipamento a fim de garantir a correta medida da profundidade (ARTILHEIRO, 2005, p.153). Este procedimento normalmente é executado através de barras de calibração. Entretanto, em função de sua melhor precisão, neste trabalho foi empregado o perfilador de velocidade do som DIGIBAR-PRO. Este equipamento grava amostras de velocidade do som ao longo de uma coluna d'água, adotando-se o valor médio para calibração do ecobatímetro.

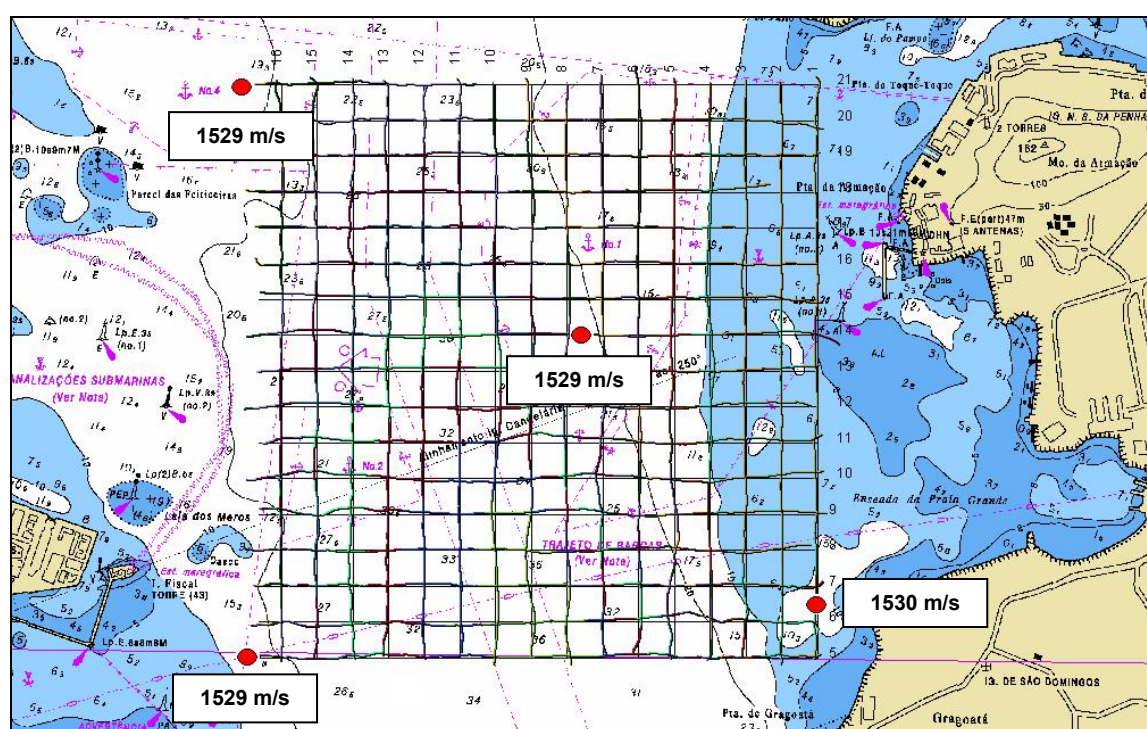


FIGURA 40 - PONTOS DE COLETA DE PERFIS DE VELOCIDADES DO SOM COM DIGIBAR-PRO

Para cada dia de sondagem foram coletados três perfis para verificação da variação temporal e espacial da velocidade do som, simbolizados por círculos vermelhos na FIGURA 40. Devido à pequena extensão da área de sondagem, a velocidade média do som em todos os perfis se manteve constante em 1529 m/s, exceto a última coleta do dia 28 de julho, em que a média foi de 1530 m/s.

4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Em levantamentos hidrográficos, a determinação das profundidades reduzidas tem sido um procedimento invariavelmente pós-processado. Depende da revisão, análise e correção dos dados dos sensores associados, possíveis sondagens anômalas, variações da velocidade do som, dados de marés e efeitos decorrentes do calado dinâmico. O recomendável é que o pós-processamento dos dados tenha a mesma duração dos trabalhos de campo, garantindo uma análise rigorosa dos dados coletados. Sendo assim o posicionamento cinemático pós-processado também é admissível (WONG et al., 2000), dependendo do volume de dados coletados. Dentro deste contexto, apesar da técnica RTK fornecer coordenadas em tempo real, as altitudes elipsoidais serão pós-processadas para geração das correções de marés reduzidas T_2 . Mesmo com o emprego do sensor inercial TSS 335B, a variação das altitudes elipsoidais que refletem a oscilação de maré apresentam ainda ruídos de alta frequência. Segundo CLARKE et. al. (2005), as observações dos sistemas WADPGS de alta precisão, técnica RTG (Real Time GIPSY), deveriam ainda ser corrigidas do efeito das marés terrestres.

As altitudes elipsoidais, fornecidas pelas *strings* (FIGURA 36) dos receptores GPS e gravadas através do programa HYPACK, foram processadas de acordo com a expressão (2.33), a partir dos valores calculados para as alturas das antenas (Tabela 18) e das separações verticais entre o NR local e o elipsóide associado ao WGS-84 G1150 (FIGURAS 24 e 25). Este processamento permite o cálculo das correções de marés T_2 através de um modelo matemático adequado, eliminando uma das fontes de erros na etapa de redução batimétrica, representada pela necessidade de interpolações temporais através dos DRP (Diagramas de Redução de Profundidade), conforme apresentado na seção 2.2.1.

As profundidades reduzidas são então submetidas ao controle de qualidade do levantamento através de verificações nos pontos de checagem, fornecendo um padrão de comparação entre as técnicas convencionais e a metodologia RTK proposta. As reduções batimétricas foram processadas a partir de observações maregráficas (correções T_1), que serviram de padrão para comparação das sondagens reduzidas através das correções geradas pelas altitudes elipsoidais (T_2) dos equipamentos RTK / RTG.

O programa de aquisição automática HYPACK é um software comercial, não sendo mais indicado para uma pesquisa científica. Em função disto foi desenvolvido o programa SIRBAT/GPS (Sistema de Reduções Batimétricas GPS), na plataforma *Borland Delphi*, a fim de permitir uma investigação mais apurada dos dados coletados pelo HYPACK. As informações de profundidade, posição e atitude são gravadas sequencialmente pelo HYPACK, em uma escala de tempo que considera até o centésimo do segundo. Assim sendo, os dados encontram-se deslocados no tempo entre 0,1 e 0,5 segundos em relação aos dados brutos, empregados no pós-processamento para obtenção das coordenadas padrão, e para o cálculo das correções T_2 . Isto inviabilizaria uma análise de acurácia horizontal dos sistemas RTK, RTG e DGPS, uma vez que, considerando a velocidade média de deslocamento da embarcação de sondagem de 3 m/s, representaria erros de 0,30 a 1,5 metro, contudo tais deslocamentos são pouco significativos para a análise da acurácia vertical. Da mesma forma, as correções de marés T_2 também devem ser aplicadas às sondagens em um instante bem definido. Por exemplo, enquanto o programa SIRBAT/GPS registra uma sondagem de 20,950 m para o instante 10h02m33s, o HYPACK apresenta duas informações para o mesmo segundo: um valor de 20,90 m (10h02m33,12s) e 20,95 m (10h02m33,62s).

O SIRBAT/GPS realiza o cálculo das alturas das antenas GPS, através do método de GOLDAN (seção 3.1.4); processamento e aplicação das correções de marés T_2 para o instante exato de cada sondagem; análise das marés GPS observadas; e análise de qualidade através das linhas de verificação, como serão apresentadas nos itens subseqüentes.

4.1 SISTEMA DE REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GPS (SIRBAT/GPS)

O programa SIRBAT/GPS (Sistema de Reduções Batimétricas GPS), cuja tela inicial é apresentada na FIGURA 41, foi desenvolvido, de forma continuada durante toda a pesquisa, baseado em plataforma Borland Delphi 4, empregando um banco de dados Paradox. Composto por 12 diferentes formulários, com aproximadamente 6800 linhas de programação *Turbo Pascal*. As principais operações realizadas pelo programa são:

- a) cálculo da altura da antena GPS em relação à linha d'água média da embarcação de sondagem, durante determinado período de observação;
- b) cálculo das correções de marés GPS a partir das altitudes elipsoidais adquiridas através de arquivos NMEA, coletados diretamente por programas de comunicação, como HyperTerminal, ou através dos arquivos brutos (*.RAW) gerados pelo programa HYPACK, durante os levantamentos hidrográficos;
- c) análise de qualidade da maré, definida pela tendência da variação das altitudes elipsoidais;
- d) análise das linhas de verificação, para estimar a qualidade do levantamento; e
- e) exportação de dados.

Existem outras funções no programa, ainda em desenvolvimento, mas que não tiveram relevância para a conclusão deste trabalho.

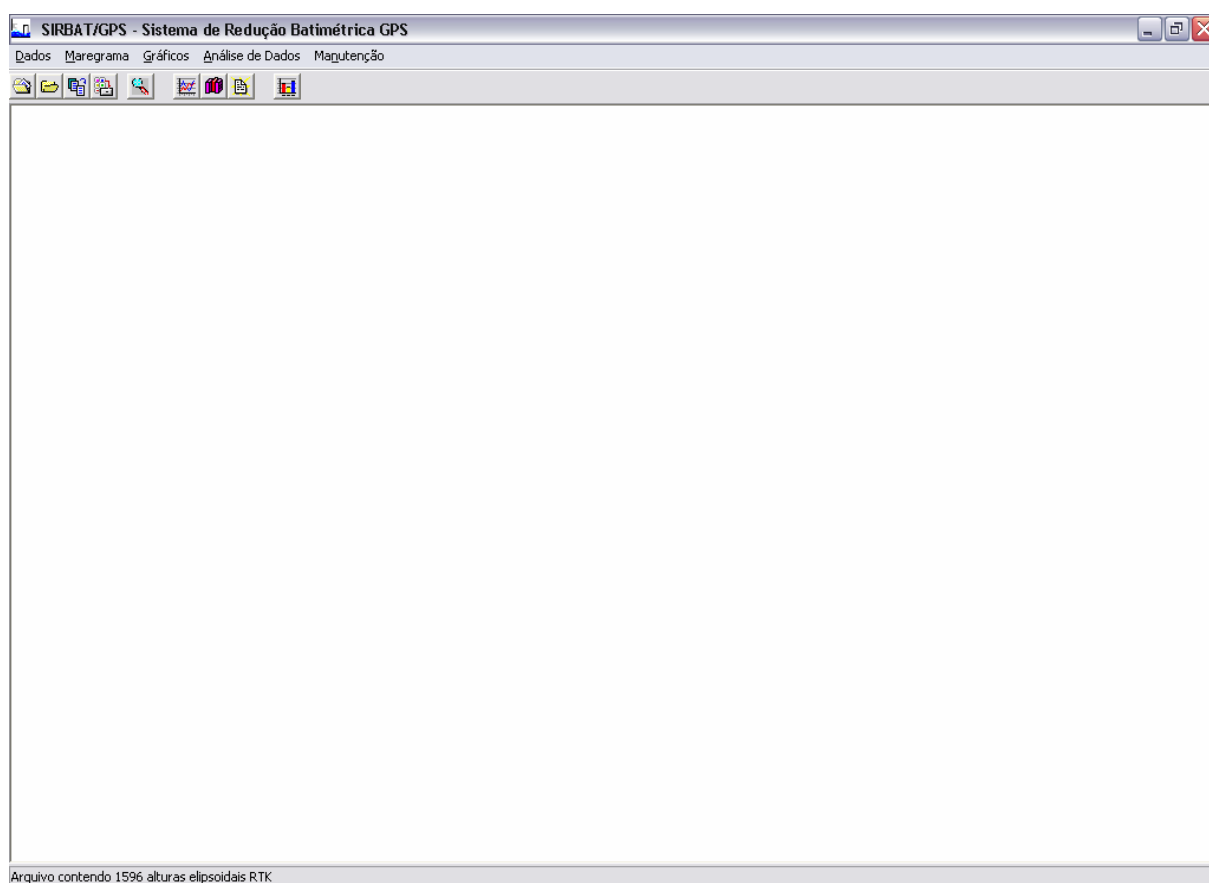


FIGURA 41 - TELA INICIAL DO PROGRAMA SIRBAT/GPS

4.1.1 Entrada de dados

O banco de dados do programa recebe as informações através das seguintes opções do menu Dados (FIGURA 42):

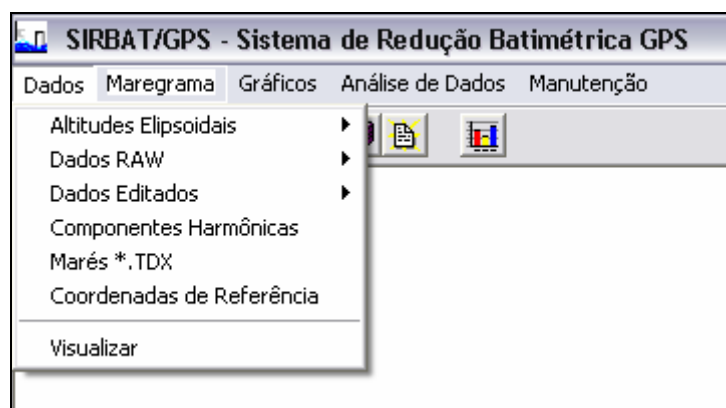


FIGURA 42 - MENU DADOS

- a) **Altitudes Elipsoidais**: entrada de arquivos no formato ASCII, contendo as mensagens NMEA transmitidas pelos receptores GPS, e gravadas diretamente através de programas de comunicação do tipo HyperTerminal.
- b) **Dados RAW**: entrada dos arquivos brutos HYPACK (*.RAW), em formato ASCII, gravados durante a execução dos levantamentos hidrográficos.
- c) **Dados Editados**: entrada dos arquivos editados (*.EDT) através do programa *Single Beam Editor*, do pacote HYPACK, que permite a correção dos *offsets* entre os sensores de posicionamento, atitude e transdutor do ecobatímetro.
- d) **Coordenadas de Referência**: permite a entrada de arquivos, no formato ASCII, contendo as coordenadas padrão, geradas a partir de um posicionamento relativo cinemático das observações brutas GPS, realizado *a priori*.

Os submenus (a), (b) e (c) apresentam, cada um, mais três opções para selecionar o equipamento de origem dos dados (RTK Trimble, RTG C-Nav e RTK FlexPak). Os submenus **Marés *.TDX** e **Componentes Harmônicas** não foram desenvolvidos para este trabalho.

As informações contidas em cada mensagem NMEA, arquivos brutos HYPACK, ou arquivo editado HYPACK, são armazenadas em tabelas específicas do banco de dados.

4.1.2 Cálculo das correções de marés GPS (T_2)

O primeiro passo é gerar o maregrama GPS em função das variações das altitudes elipsoidais, previamente armazenadas no banco de dados, conforme descrito na seção 4.1.1. O maregrama GPS é carregado através do submenu **Marés RTG/RTK** do menu **Maregrama** (FIGURA 43).

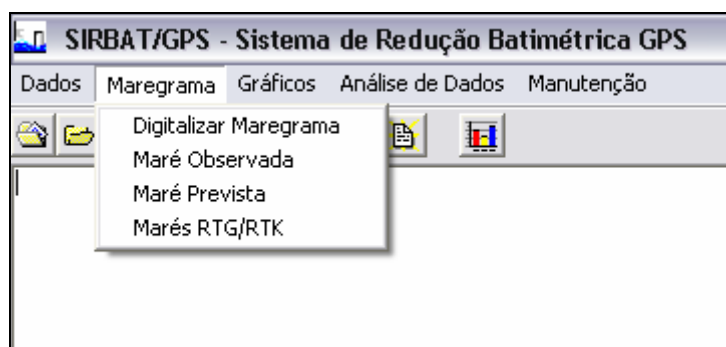


FIGURA 43 - GERAÇÃO DO MAREGRAMA GPS RTK / RTG

É solicitado ao usuário que selecione uma taxa de amostragem das altitudes elipsoidais para geração do maregrama GPS, e a partir de qual equipamento serão coletadas estas altitudes (FIGURA 44).



FIGURA 44 - SELEÇÃO DO EQUIPAMENTO RTK / RTG E TAXA DE AMOSTRAGEM

A seleção da taxa de amostragem deverá ser maior que o intervalo de gravação dos dados (mensagens NMEA e arquivos *.RAW), e permite reduzir o volume de dados a serem processados. Apesar dos dados terem sido gravados em intervalos de 1 segundo, a taxa de 15 segundos proporciona uma boa amostragem da tendência das altitudes elipsoidais.

As altitudes elipsoidais passam por um processo de filtragem para remover aquelas que não sejam oriundas de soluções fixas de posicionamento RTK / RTG. Todo o processamento das altitudes elipsoidais para a geração das correções de marés GPS RTK é realizada através do submenu **Correções de Maré** do menu **Gráficos** (FIGURAS 45 e 46).

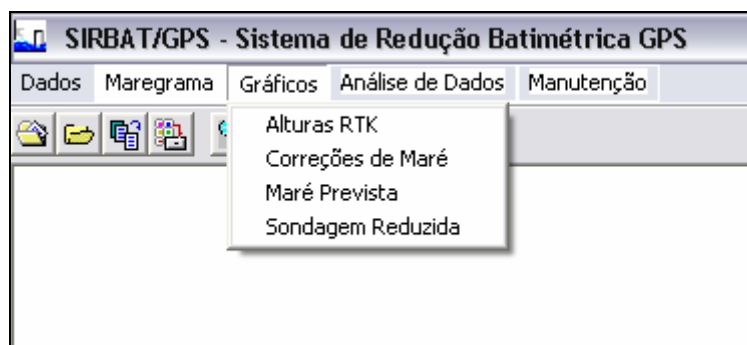


FIGURA 45 - SUBMENU CORREÇÕES DE MARÉS

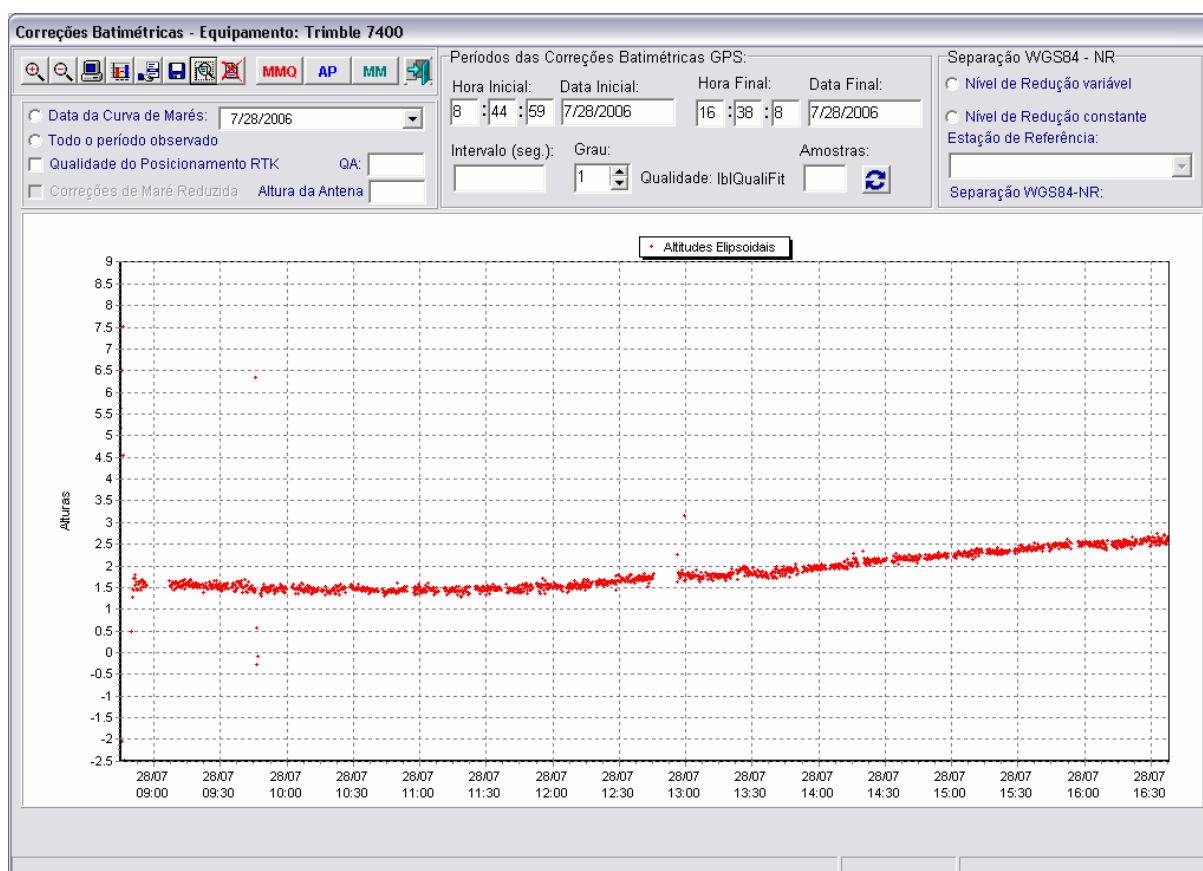


FIGURA 46 - PROCESSAMENTO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG

A FIGURA 46 apresenta o maregrama GPS, a partir das altitudes elipsoidais gravadas no banco de dados. No exemplo, são apresentadas as altitudes elipsoidais do sistema RTK Trimble. As altitudes são filtradas e combinadas com as informações de altura da antena (FIGURA 47) e separação vertical entre o NR de uma determinada estação maregráfica e o elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150 (FIGURA 48), para geração das correções de marés GPS RTK.



FIGURA 47 - FILTRAGEM DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIIS E ALTURA DA ANTENA GPS RTK

No exemplo da FIGURA 47, serão geradas correções de marés para o dia 28/07/2006 a partir de soluções de posição RTK de qualidade 3 (ambigüidades fixas), considerando a altura da antena GPS de 7,699 metros e o valor da separação vertical NR - WGS-84 G1150 obtido na estação maregráfica da Ponta da Armação de -6,689 metros (FIGURA 48), significando que o elipsóide encontra-se acima do NR.

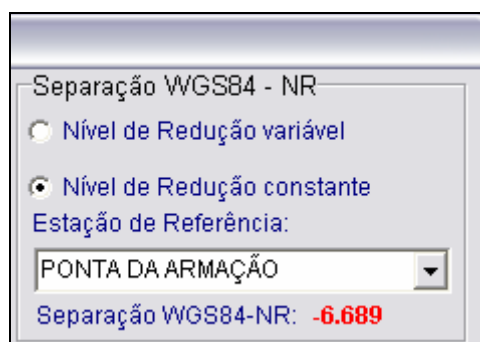


FIGURA 48 - SELEÇÃO DA SEPARAÇÃO VERTICAL WGS-84 - NR

A separação vertical poderá ainda considerar linear a variação do NR entre as estações maregráficas da Ilha Fiscal e Ponta da Armação, selecionando-se a opção **Nível de Redução variável**.

Clicando-se no botão Executar Gráfico (FIGURA 49), as correções de marés são processadas de acordo com os parâmetros previamente selecionados.

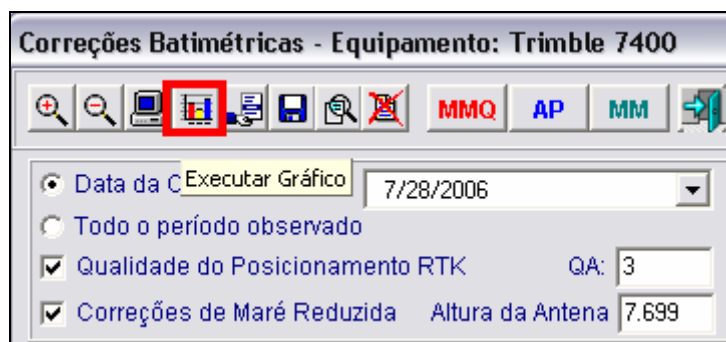


FIGURA 49 - BOTÃO PARA CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS

Após o término do processamento, é apresentado um novo gráfico contendo as correções de marés GPS (FIGURA 50).

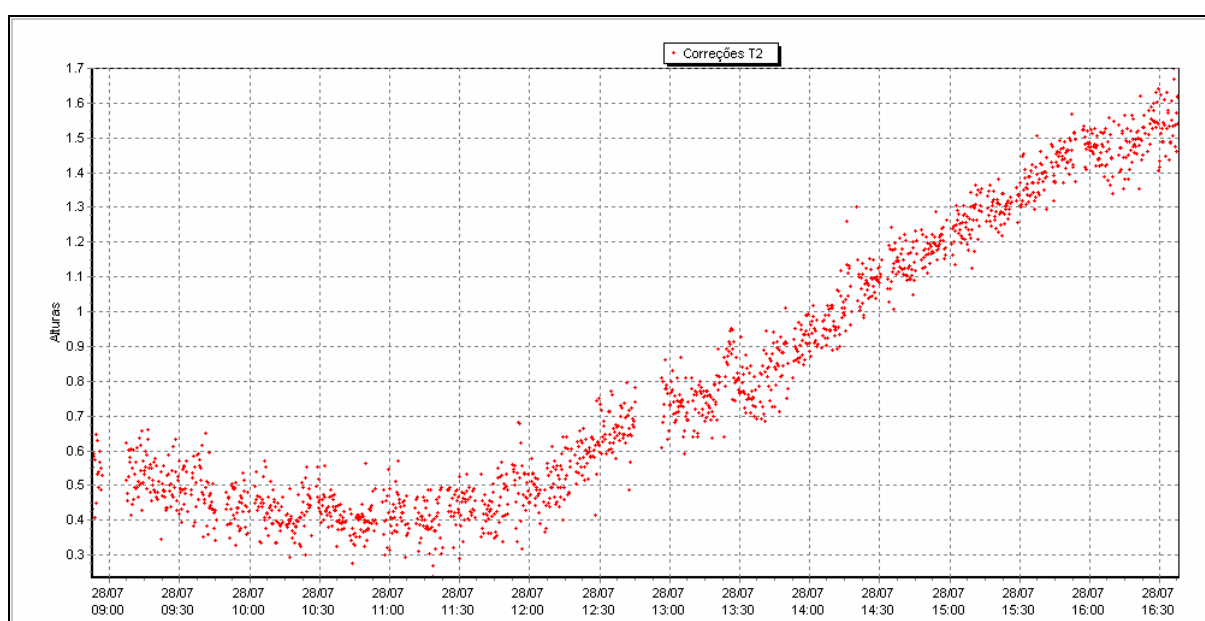


FIGURA 50 - GRÁFICO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS

As correções apresentadas no gráfico da FIGURA 50 estão amostradas de acordo com a taxa previamente selecionada (FIGURA 44), podendo-se ter uma idéia da precisão de aproximadamente 10 cm em seus valores, ao longo do período selecionado. Na etapa seguinte, o programa faz um ajustamento desta nuvem de pontos, associando-as ao modelo matemático de equação harmônica simplificada da

maré (botão MMQ) ou a modelos polinomiais (botão AP), podendo ainda ser empregada uma filtragem por média móvel (botão MM), destacados na FIGURA 51.



FIGURA 51 - BOTÕES PARA AJUSTAMENTO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS

As correções podem ser geradas em intervalos de tempo definidos pelo usuário, para um período selecionado (FIGURA 52). Como as sondagens foram adquiridas com intervalos de 1 segundo, as correções também podem ser geradas neste mesmo intervalo, eliminando a necessidade dos DRP.

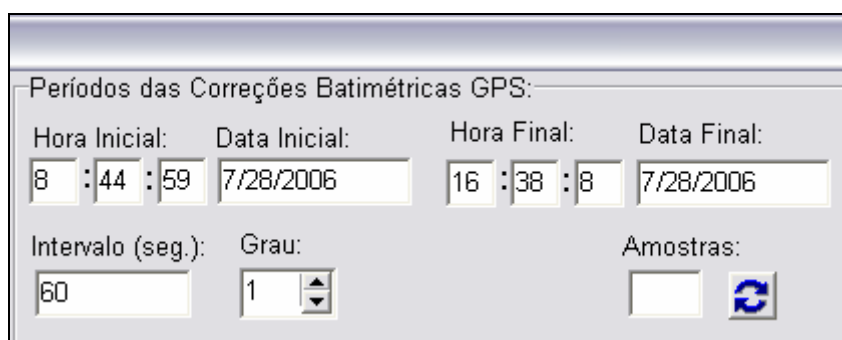


FIGURA 52 - PARÂMETROS PARA GERAÇÃO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS

No exemplo da FIGURA 52, as correções de marés serão geradas pelo modelo matemático selecionado, a um intervalo de 60 segundos, no período de 08h44m59s a 16h38m08s do dia 28/07/06. A opção **Grau**, refere-se ao grau do polinômio empregado para ajustar as correções de maré, enquanto a opção **Amostras** permite selecionar a quantidade de elementos para filtragem de média móvel. Os modelos matemáticos utilizados serão abordados na seção 4.2.

Ao término do processo de ajustamento ou filtragem é apresentado um gráfico das correções ajustadas (FIGURA 53), que são gravadas no banco de dados para

posterior aplicação aos dados editados (*.EDT) pelo programa HYPACK, gerando, assim, as profundidades reduzidas.

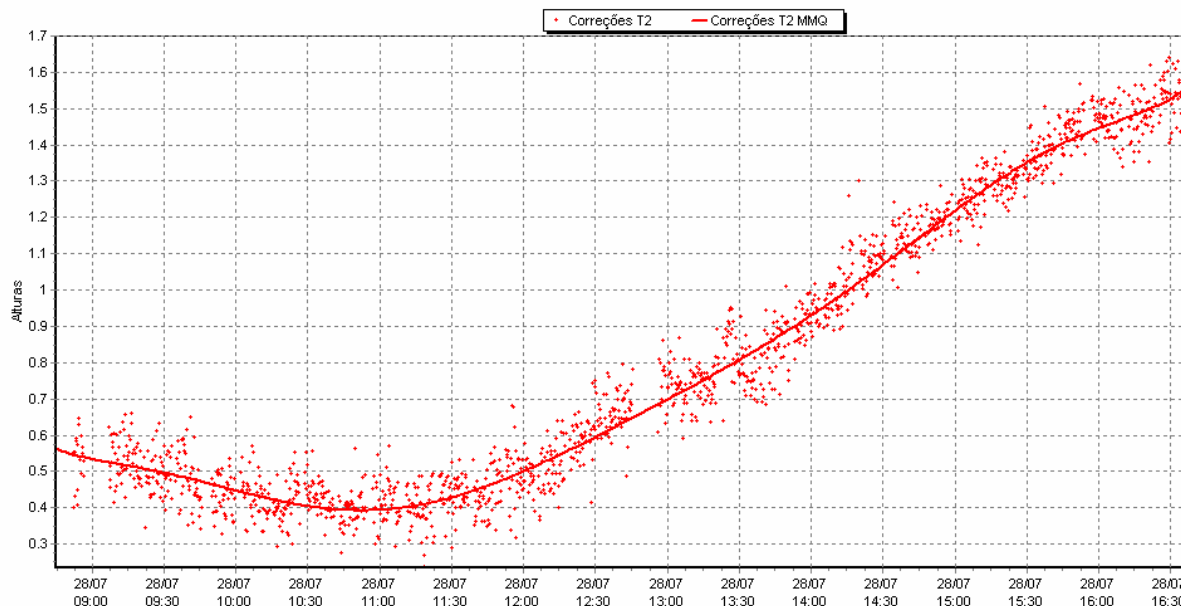


FIGURA 53 - CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ A UMA TAXA DE 60 SEGUNDOS

4.1.3 Aplicação das correções de marés e análise das linhas de verificação

A análise das linhas de verificação é acessada através do submenu Linhas de Verificação do menu Análise de Dados, conforme a FIGURA 54.

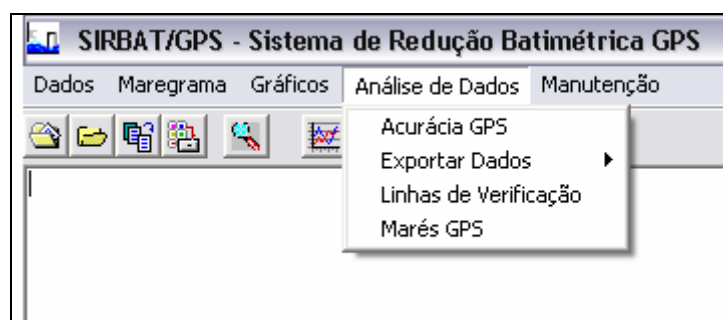


FIGURA 54 - SUBMENU LINHAS DE VERIFICAÇÃO

Através desta opção também é possível efetuar a redução batimétrica empregando as correções de marés GPS RTK calculadas anteriormente. Para evitar possíveis inconsistências, o formulário de análises das linhas de verificação (FIGURA 55) só é acessado caso os dados editados (*.EDT) e as correções de

marés GPS RTK sejam oriundas do mesmo equipamento (RTK Trimble, RTK FlexPak ou RTG C-Nav).

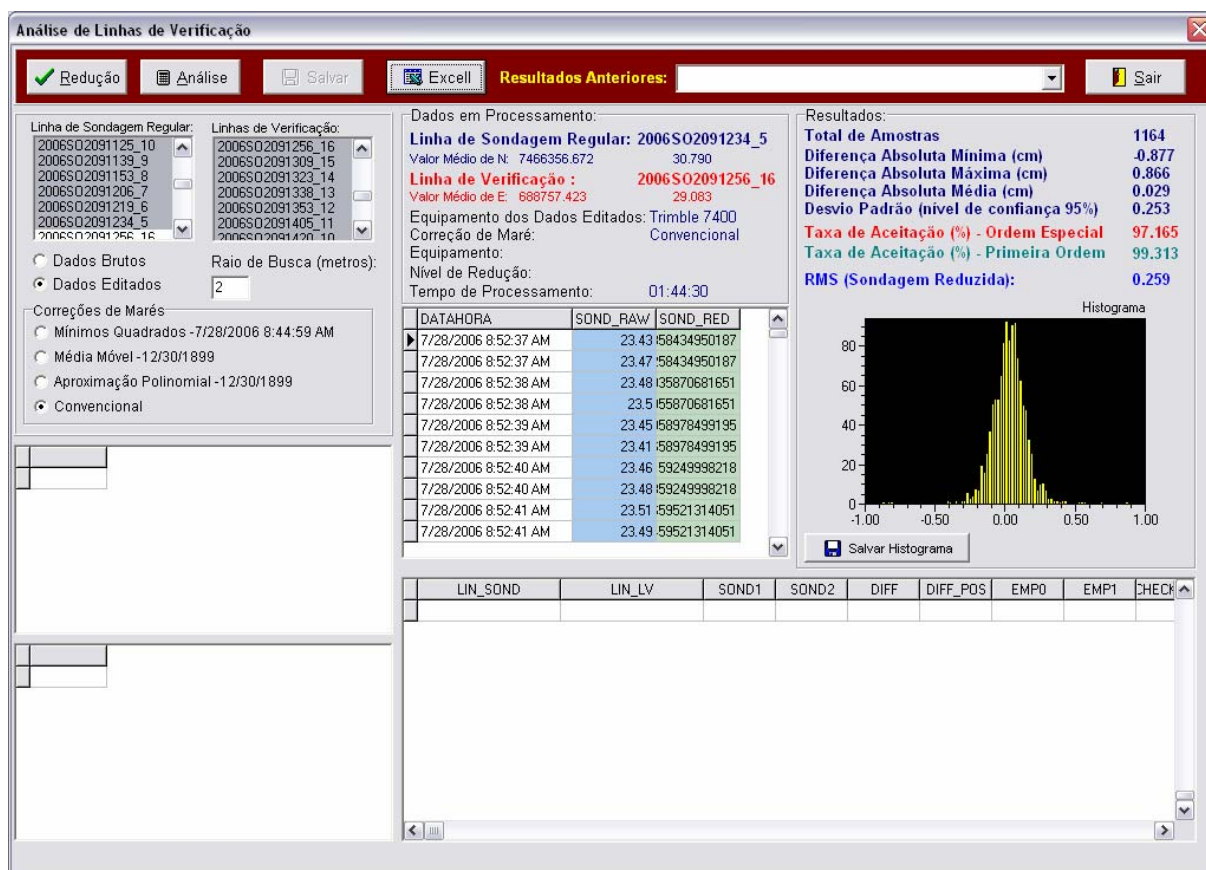


FIGURA 55 - PROCESSAMENTO DAS REDUÇÕES BATIMÉTRICAS E ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO

Para efetuar as reduções batimétricas basta selecionar na caixa de opções **Correções de Marés** o tipo de correção a ser efetuada, e clicar no botão **Redução**. No exemplo da FIGURA 56 estão disponíveis apenas correções ajustadas por MMQ.

A FIGURA 56 apresenta outros parâmetros para configuração da análise das linhas de verificação. A análise poderá ser realizada a partir dos **Dados Editados**, oriundos do processamento pelo programa *Single Beam Editor* do HYPACK, ou a partir dos **Dados Brutos** (*.RAW). Esta última opção não é muito usual, uma vez que incorpora vários erros grosseiros decorrentes do processo de aquisição dos dados em campo. Foi inserida no programa apenas para testes futuros. Deve ser escolhido o tamanho do **Raio de Busca**, em torno do qual o programa irá considerar as diferenças entre as profundidades reduzidas contidas nas linhas de sondagem

regular e de verificação. E por fim, devem-se indicar quais são as **Linhas de Sondagem Regular** e as **Linhas de Verificação**.

FIGURA 56 - PARÂMETROS PARA ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO

Ao término do processamento é apresentado um sumário estatístico dos resultados das diferenças obtidas (FIGURA 57).

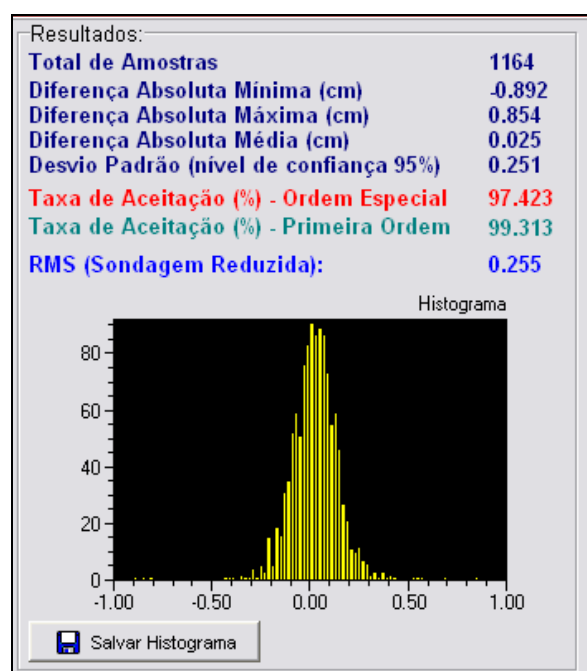


FIGURA 57 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DA ANÁLISE DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO

Ao término da análise os resultados podem ser gravados no banco de dados do programa, para posterior consulta, e exportados para uma planilha do Microsoft Excel.

O tempo de processamento varia de acordo com o volume de dados analisados, e da capacidade computacional. Nas análises foram consideradas todas as sondagens adquiridas a uma taxa de 1 segundo, resultando em tempos de processamentos médios de duas horas.

4.1.4 Cálculo da altura da antena GPS e análise da maré GPS (T_2)

Um dos parâmetros para a obtenção das correções de marés GPS é a altura da antena GPS, em relação ao referencial da embarcação de sondagem. Neste trabalho este cálculo é realizado através do método de GOLDAN (1994), a partir de observações da variação do nível do mar em uma estação maregráfica de referência, e altitudes elipsoidais, gravadas nos arquivos brutos HYPACK (*.RAW) ou diretamente nas mensagens NMEA, obtidas através de programas de comunicação, tais como HyperTerminal.

A análise da maré GPS é realizada por comparação da maré observada com a curva de tendência da variação das altitudes elipsoidais. A maré observada, referenciada ao zero da régua da estação maregráfica, é diretamente inserida pelo submenu **Maré Observada** do menu **Maregrama** (FIGURA 58), através de um arquivo ASCII.

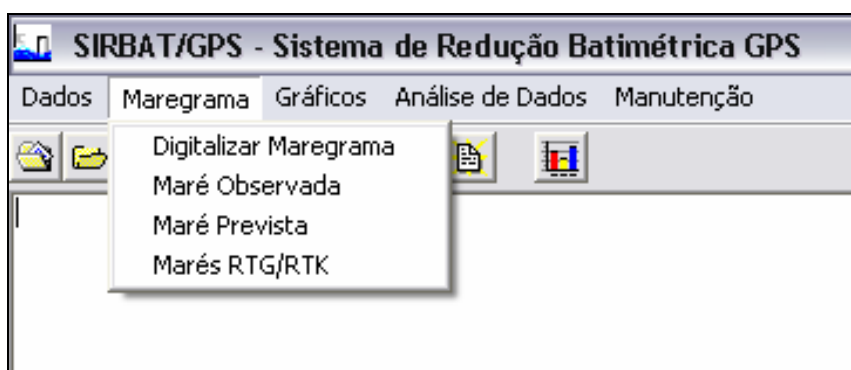


FIGURA 58 - SUBMENU MARÉ OBSERVADA

E a análise da qualidade das marés GPS (FIGURA 60) é acessada pelo submenu **Marés GPS** do menu **Análise de Dados** (FIGURA 59).

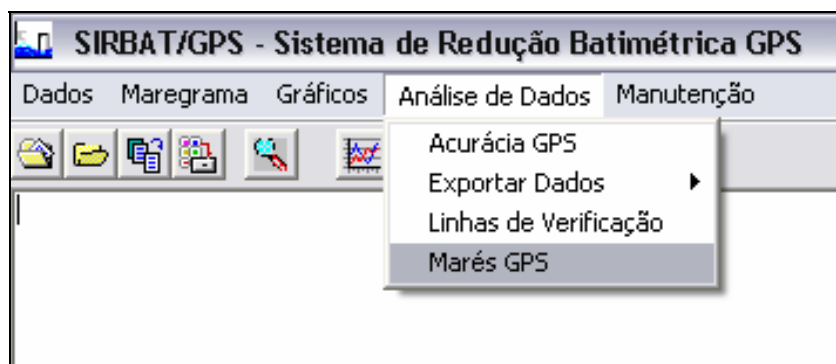


FIGURA 59 - SUBMENU MARÉS GPS

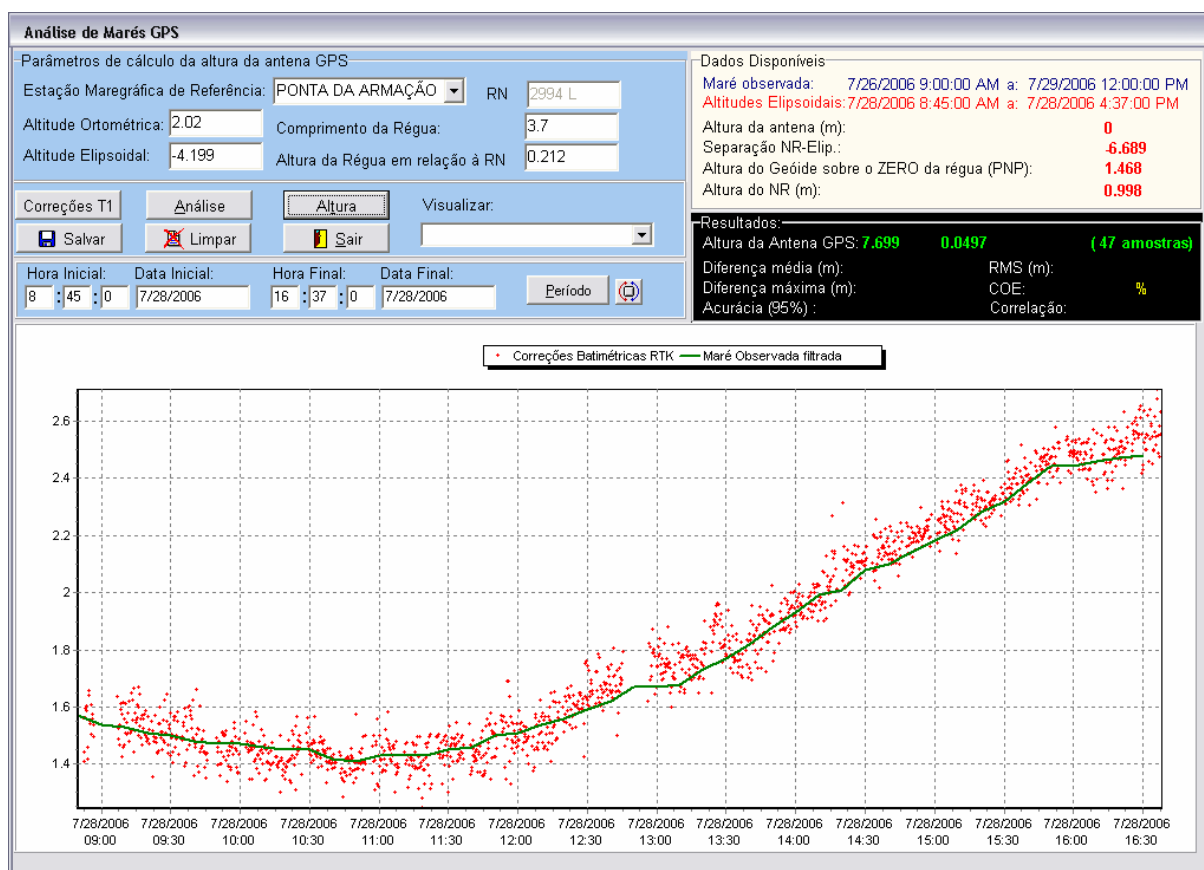


FIGURA 60 - CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA GPS

O cálculo da altura da antena GPS é realizado pelo método de GOLDAN (1994) a partir das informações de altitude ortométrica e elipsoidal de uma RN da estação maregráfica de referência, comprimento da régua maregráfica e desnível entre a RN de referência e a régua, determinado por meio de nivelamento geométrico. Estas informações são inseridas pelo usuário, conforme a FIGURA 61.

O programa realiza o cálculo da altura da antena de acordo com uma média da expressão (3.6).

FIGURA 61 - PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA GPS

O resultado (FIGURA 62) é apresentado logo após o término do processamento, contudo não é armazenado no banco de dados.

FIGURA 62 - RESULTADO DO CÁLCULO DA ALTURA DA ANTENA PELO MÉTODO DE GOLDAN

A altura da antena GPS calculada é introduzida (FIGURA 51) no programa para cálculo das correções de marés T_2 . A acurácia destas correções pode ser estimada, clicando no botão *Análise* da tela apresentada na FIGURA 61. Os resultados são apresentados conforme ilustra a FIGURA 63.

Resultados:			
Análise comparativa de Maré			
Diferença média (m):	0.000	RMS (m):	0.00012
Diferença máxima (m):	0.052	COE:	100.00 %
Acurácia (95%) :	0.0249	Correlação:	0.9986

FIGURA 63 - RESULTADO DA ANÁLISE DE ACURÁCIA DAS CORREÇÕES DE MARÉS

A importância do SIRBAT/GPS está ligada à transparência dos resultados, determinados de forma independente dos programas comerciais de processamento de dados batimétricos, cujos cálculos, algumas vezes, não são claramente especificados nos manuais.

4.2 CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG (T_2)

As correções de marés GPS, obtidas pela expressão (2.33), refletem a movimentação vertical sofrida pela antena RTK / RTG durante o deslocamento da embarcação de sondagem. Esta movimentação é altamente correlacionada com a maré observada pelos mareógrafos, entretanto inclui também variações em atitude, efeitos meteorológicos e demais ruídos associados ao ambiente, à embarcação e às próprias observações GPS. As correções são então ajustadas através de um modelo matemático apropriado, tratando de forma estocástica todas as oscilações que não sejam decorrentes da tendência principal representada pela própria onda de maré. Outra possibilidade de obtenção das correções de marés T_2 , é a aplicação de filtros passa baixa, como é o caso das médias móveis utilizadas pelos programas comerciais para eliminação dos ruídos de alta frequência. Os modelos matemáticos testados neste trabalho são baseados na equação harmônica simplificada de maré, e em um modelo polinomial, também empregado para ajuste da curva obtida através da média móvel. Estas curvas de correções de marés T_2 são comparadas com as observações maregráficas tomadas nas estações de referência, consideradas como um valor padrão. Assim a redução batimétrica neste trabalho foi realizada através da aplicação de correções de marés:

- a) convencionais (T_1), a partir das estações maregráficas; e
- b) GPS RTK / RTG (T_2), processadas através de:
 - equação harmônica simplificada da maré;
 - média móvel; e

- aproximação polinomial.

Em todos os casos, a separação entre o NR e o elipsóide de referência será considerada constante. Uma outra hipótese de processamento de dados é a aplicação da expressão (2.36), que considera a variação linear do NR. As altitudes elipsoidais obtidas pelos sistemas HADGPS (High Accuracy DGPS) (WELLS²³,2006) devem ser corrigidas dos efeitos das marés terrestres e carga dos oceanos (NORDEN et al.,2005), de acordo com a nota técnica nº 32 do IERS.

São apresentados na seqüência os modelos matemáticos aplicados neste trabalho e análises de suas respectivas correções de marés.

4.2.1 Modelo Matemático da Equação Harmônica Simplificada de Maré

Modelo matemático baseado na expressão (2.12) da altura da maré astronômica utilizado para ajustamento das observações de altitudes elipsoidais, pelo processo dos mínimos quadrados, dado pela expressão:

$$Y(t) = Z_0 + \sum_{k=1}^j [a_k \cdot \cos(\omega_k \cdot t) + b_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t)] \quad (4.1)$$

Sendo j igual a quantidade de componentes harmônicas principais ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$) empregadas no cálculo do nível de redução, de acordo com a seção 2.1.4.2. Portanto os parâmetros a serem determinados pelo ajustamento são as amplitudes a_k e b_k e o nível médio Z_0 , já que as frequências angulares são invariáveis para cada componente, conforme a Tabela 4.

O vetor dos parâmetros desconhecidos $X^T = [Z_0 \ a_1 \ b_1 \ a_2 \ b_2 \ a_3 \ \dots \ a_7 \ b_7]^T$ é dado pela solução do sistema de equações normais através da expressão $X = -N^{-1} \cdot U$, sendo a matriz normal N dada por $A^T \cdot A$. A matriz A , denominada matriz design, é obtida pelas derivadas parciais do modelo matemático funcional em relação aos parâmetros:

²³ WELLS,D. (2006) comunicação pessoal. Curitiba, 17 maio 2006.

$${}_n A_7 = \begin{bmatrix} \frac{\partial Y(t_1)}{\partial Z_0} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial a_1} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial b_1} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial a_2} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial b_2} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial a_7} & \frac{\partial Y(t_1)}{\partial b_7} \\ \frac{\partial Y(t_2)}{\partial Z_0} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial a_1} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial b_1} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial a_2} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial b_2} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial a_7} & \frac{\partial Y(t_2)}{\partial b_7} \\ \frac{\partial Y(t_3)}{\partial Z_0} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial a_1} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial b_1} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial a_2} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial b_2} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial a_7} & \frac{\partial Y(t_3)}{\partial b_7} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Y(t_n)}{\partial Z_0} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial a_1} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial b_1} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial a_2} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial b_2} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial a_3} & \dots & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial a_7} & \frac{\partial Y(t_n)}{\partial b_7} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde n é o número de altitudes elipsoidais observadas em relação ao nível de redução local. Substituindo os valores na matriz A , de acordo com o modelo matemático funcional:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\omega_1 t_1) & \sin(\omega_1 t_1) & \cos(\omega_2 t_1) & \sin(\omega_2 t_1) & \cos(\omega_3 t_1) & \dots & \cos(\omega_7 t_1) & \sin(\omega_7 t_1) \\ 1 & \cos(\omega_1 t_2) & \sin(\omega_1 t_2) & \cos(\omega_2 t_2) & \sin(\omega_2 t_2) & \cos(\omega_3 t_2) & \dots & \cos(\omega_7 t_2) & \sin(\omega_7 t_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\omega_1 t_n) & \sin(\omega_1 t_n) & \cos(\omega_2 t_n) & \sin(\omega_2 t_n) & \cos(\omega_3 t_n) & \dots & \cos(\omega_7 t_n) & \sin(\omega_7 t_n) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A solução do sistema de equações lineares do ajustamento acima conduz a um valor quase singular da matriz N . Isto representa uma instabilidade da solução, implicando em grandes variações dos parâmetros em função de pequenas alterações das altitudes observadas. Neste caso, utiliza-se um ajustamento livre, através da pseudoinversa da matriz N (N^+). O ajustamento livre permite uma adequação da curva aos valores observados, independentemente de qualquer injunção inicial. Entre os vários algoritmos existentes, optou-se pelo cálculo da pseudoinversa através da decomposição de valor singular, em função da facilidade de programação (NASH,1990):

$${}_n N_n = {}_n B_n \cdot {}_n S_n \cdot {}_n V_n^T \quad (4.4)$$

onde as matrizes B e V são ortogonais e S é uma matriz diagonal, cujos elementos são denominados valores singulares, de tal forma que:

$$S_{11} \geq S_{22} \geq S_{33} \geq \dots \geq S_{nn} \quad (4.5)$$

e sua pseudoinversa:

$$N^+ = V.S^+.B^T \quad (4.6)$$

onde:

$$S_{ii}^+ = \begin{cases} 1/S_{ii} & \text{Para } S_{ii} \neq 0 \\ 0 & \text{Para } S_{ii} = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

4.2.2 Média Móvel

Método de suavização de séries temporais, que visa a eliminação de ruídos aleatórios, normalmente de alta frequência presentes nas observações, permitindo a observação da tendência dos dados. Uma simples média móvel de tamanho 5 será dada pela expressão abaixo, cujos valores médios são associados ao valor de tempo central (KENNEY e KEEPING,1961,p.221):

$$\begin{cases} \bar{y}_2 = (y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/5 \\ \bar{y}_3 = (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5)/5 \\ \bar{y}_4 = (y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6)/5 \end{cases} \quad (4.8)$$

Considerando que as observações tenham sido tomadas a intervalos de tempo constantes, o tamanho da média deverá ser escolhido de tal forma que compreenda o período total do ruído que se deseja eliminar. Para medidas de correções de maré RTK é recomendado a utilização de um intervalo de amostragem de 5 minutos (SCARFE,2002). Como normalmente as médias são associadas ao valor central de tempo, deve-se escolher um número ímpar para o tamanho das amostras.

Um problema advindo do uso das médias móveis para $2k+1$ termos, é que são perdidos k termos no início e no fim da série, uma vez que a média é associada ao termo central dos $2k+1$ termos.

4.2.3 Aproximação Polinomial

A curva de marés RTK é suavizada através do Método dos Mínimos Quadrados empregando como modelo matemático um polinômio de grau n .

O grau do polinômio determinará uma melhor aproximação da curva de correções RTK. Observa-se, através do gráfico (FIGURA 64) de variação do desvio padrão em função do grau do polinômio, que os desvios padrão permanecem constantes a partir do polinômio de grau 8 até o grau 42.

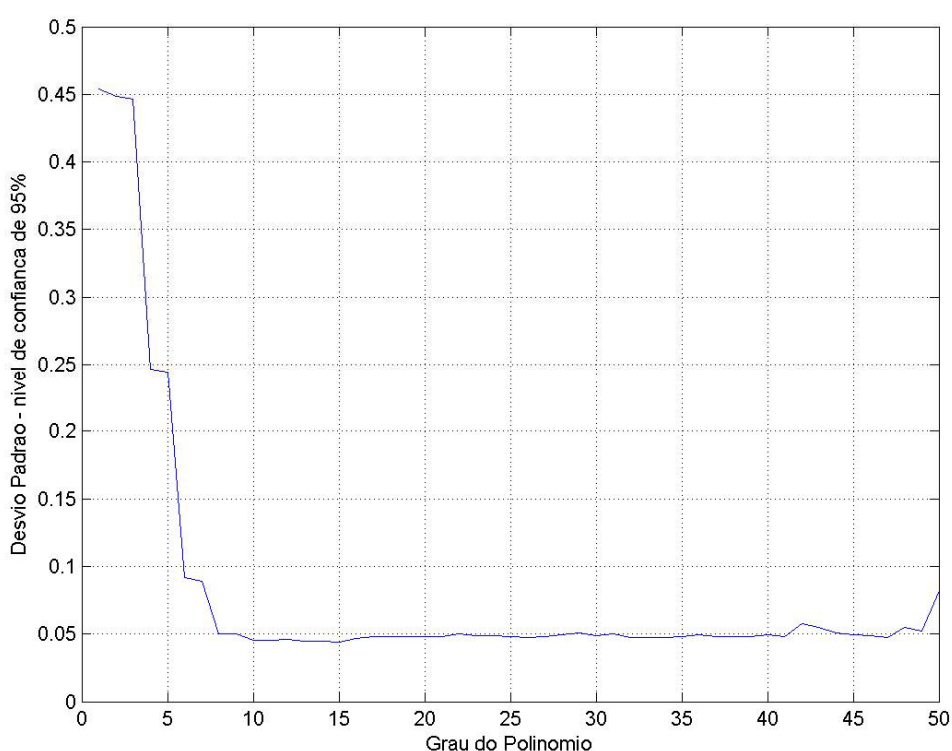


FIGURA 64 - VARIAÇÃO DO DESVIO PADRÃO DA CURVA DE CORREÇÕES DE MARÉ EM FUNÇÃO DO GRAU DO POLINÔMIO ADOTADO

4.2.4 Análise das correções de marés GPS

O princípio básico da redução batimétrica a partir do GPS está baseado na alta precisão vertical dos sistemas RTK, podendo-se também considerar os sistemas HADGPS. Porém as altitudes elipsoidais devem fornecer correções de maré correlacionadas com as observações maregráficas da região, de acordo com a precisão recomendada pela IHO (ao nível de confiança de 95%): 5 cm para levantamentos de Ordem Especial e 10 cm para levantamentos de Primeira Ordem

(IHO,2005). Visando verificar esta condição, foram realizadas observações simultâneas da variação das altitudes elipsoidais, a partir de uma taxa de aquisição de 1 segundo, e do nível do mar instantâneo nas estações maregráficas da Ilha Fiscal e Ponta da Armação, nos períodos apresentados na Tabela 18, também utilizados para o cálculo da altura das antenas GPS sobre a linha d'água da embarcação.

As correções de maré observadas foram obtidas pelas leituras diretas das variações do nível do mar e são dadas pela expressão (2.16), transcrita aqui para melhor entendimento:

$$T_1(t) = A_m(t) - (S_0 - Z_0) \quad (4.9)$$

onde:

$A_m(t)$ = leitura do nível do mar no instante t ;

S_0 = altura do Nível Médio do Mar em relação ao ZERO da régua maregráfica; e

Z_0 = altura do Nível de Redução abaixo do NMM, calculada de acordo com as Tabelas 5 e 6. Os valores de S_0 e Z_0 são as constantes de cada estação maregráfica, descritos em suas respectivas fichas F-41.

O processamento das altitudes elipsoidais (h_{RTK}) para cálculo das correções de marés GPS (T_2) foi realizado pelo programa SIRBAT/GPS (FIGURA 65) empregando os valores de separação vertical (β) entre os NR e o elipsóide associado ao WGS-84 G1150, conforme as FIGURAS 24 e 25, e uma média das alturas das antenas (a_i) calculadas no período de observação (Tabela 18), considerando apenas soluções RTK fixas, através da expressão (2.33), aqui transcrita para melhor entendimento:

$$T_2(t) = h_{RTK}(t) - \beta - a_i \quad (4.10)$$

A FIGURA 65 apresenta um exemplo das correções de marés GPS (T_2) obtidas pelo ajustamento de uma média móvel de cinco minutos das altitudes elipsoidais fornecidas pelo sistema RTK Trimble, considerando a separação vertical entre NR e elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150, calculada na estação

maregráfica da Ponta da Armação, e altura da antena de 7,699 m, obtida pelo método de GOLDAN (1994). Observa-se também na figura as correções de marés convencionais (T_1) para a mesma estação maregráfica.

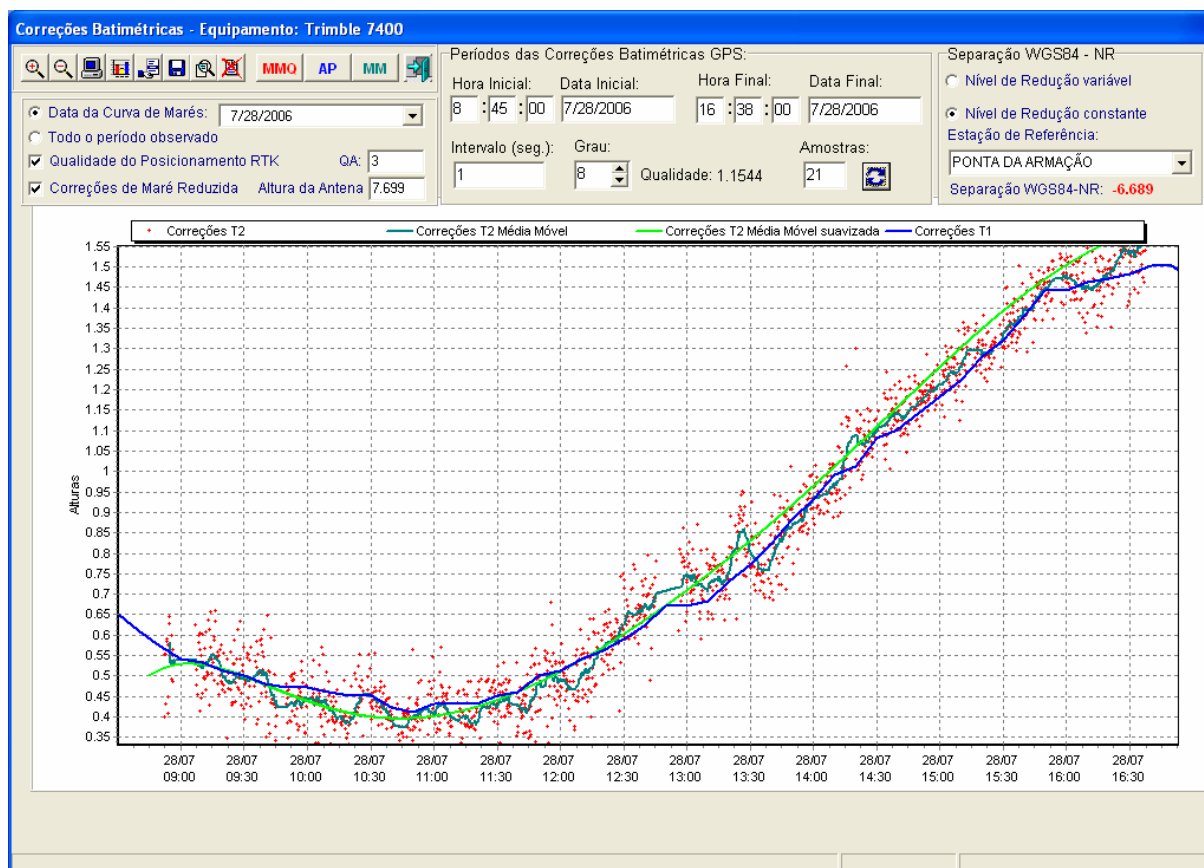


FIGURA 65 - CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS PELO SIRBAT/GPS

A análise entre as correções de marés T_1 e T_2 é realizada pelo SIRBAT/GPS, de forma automática, através dos seguintes índices, em metros: diferença média entre as correções de marés; diferença máxima; RMS relativo; acurácia, ao nível de confiança de 95%; e correlação. A diferença média denota a presença de erros sistemáticos (*bias*), em relação aos valores padrão fornecidos pelos marégrafos. O RMS relativo é um índice indicativo de acurácia proposto por YEN et. al. (1996) para análises de curvas de marés, porém não é a própria acurácia. É dado pela expressão (4.11), indicando que quanto mais próximo de zero for o RMS relativo melhor será a acurácia estimada.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^M [Y(t) - Y_t]^2}{\sum_{t=1}^M Y_t^2}} \quad (4.11)$$

onde:

$Y(t)$ - correção de maré T_2 calculada no instante t ; e

Y_t - correção de maré T_1 observada no instante t .

A acurácia envolve a precisão das medidas (σ_{ERRO}), grau de repetitividade em torno do seu valor médio, e os erros sistemáticos (σ_{BIAS}), caracterizados pelas diferenças entre as observações e um determinado valor tomado como verdadeiro. Portanto a acurácia, ao nível de confiança de 95%, é dada por:

$$Acurácia = 1,96 \cdot \left(\sqrt{\sigma_{BIAS}^2 + \sigma_{ERRO}^2} \right) \quad (4.12)$$

O método de GOLDAN (1994) apresenta a vantagem da determinação da altura da antena GPS em relação à linha d'água da embarcação, o que facilita a comparação entre as correções de marés GPS e as observações maregráficas, uma vez que ambas possuem o mesmo referencial, materializado pelo nível médio do mar do período considerado. Entretanto a altura da antena calculada passa a variar em função das mudanças de calado da embarcação, conforme pode ser observado na FIGURA 66. Caso a altura da antena GPS fosse determinada por métodos topográficos, situação ideal, haveria um erro sistemático atinente à diferença entre o referencial fixo à embarcação e o nível médio do mar do período analisado.

Para reduzir o esforço computacional, apesar da taxa de gravação de 1 segundo, as altitudes elipsoidais foram carregadas com intervalo de amostragem de 15 segundos para processamento pelo programa SIRBAT/GPS. A FIGURA 66 apresenta uma comparação das correções convencionais (T_1), obtidas na estação maregráfica da Ponta da Armação, com as correções de marés T_2 calculadas a partir das altitudes elipsoidais fixas do receptor FlexPak observadas em dois períodos distintos:

- a) De 17h27m do dia 27 de julho às 07h14m do dia 28 de julho, quando a embarcação encontrava-se atracada próxima à estação maregráfica da Ponta da Armação; e
- b) De 08h45m às 16h38m do dia 28 de julho, durante o levantamento batimétrico.

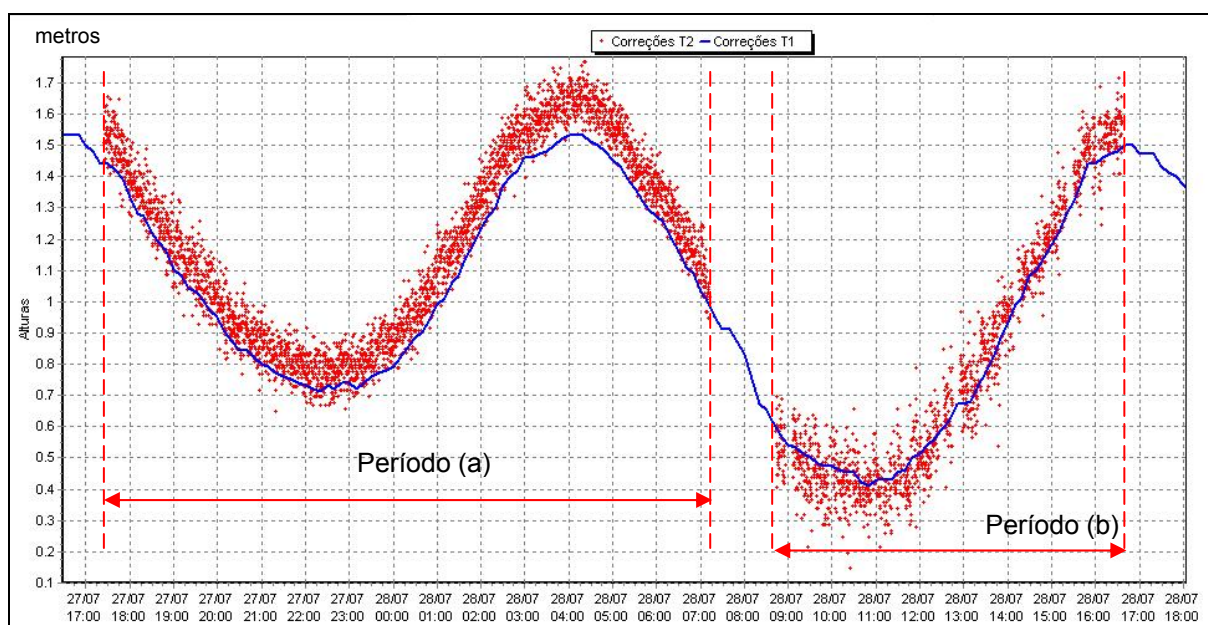


FIGURA 66 - CORREÇÕES DE MARÉS T2 FLEXPAK X T1 - PONTA DA ARMAÇÃO

Percebe-se inicialmente uma maior variabilidade das altitudes elipsoidais durante o levantamento batimétrico, em função dos ruídos inseridos pelas interações hidrodinâmicas entre o casco e a superfície da água decorrente do movimento da embarcação (FIGURAS 18 e 19), efeitos meteorológicos e variações de atitude. No primeiro período de observação (a), a embarcação apresentava uma condição de carregamento diferente daquela encontrada durante o levantamento, justificada pela altura da antena (0,160 m) superior ao valor de 0,076 m encontrado para o período de sondagem (b). Como o gráfico da FIGURA 66 foi gerado a partir da mesma altura da antena obtida para a sondagem (0,076 m), nota-se um desvio sistemático entre as correções de marés GPS FlexPak no período (a) e as correções padrão fornecidas pelo marégrafo, o que já não ocorre durante a sondagem, período (b).

Foram realizadas análises das correções de marés GPS, baseadas nas altitudes elipsoidais observadas e ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, a partir do modelo matemático da equação harmônica de maré simplificada, apresentada na seção 4.2.1, para os períodos onde a embarcação permaneceu atracada próxima às estações maregráficas, e também durante o próprio

levantamento batimétrico, de acordo com as alturas das antenas GPS apresentadas na Tabela 18. Através dos parâmetros ajustados do modelo matemático foi possível a determinação da altitude elipsoidal no mesmo instante das observações maregráficas para o cálculo das diferenças entre T_1 e T_2 .

Os resultados são apresentados na Tabela 23. A fim de demonstrar os erros sistemáticos decorrentes das variações de calado, e conseqüentes alterações da altura das antenas sobre a linha d'água, foram também consideradas as correções de marés GPS empregando um valor médio das alturas das antenas obtido durante os períodos em que a embarcação permaneceu atracada próxima à estação maregráfica de referência.

TABELA 23 - ANÁLISE DAS CORREÇÕES DE MARÉS GPS RTK / RTG

Receptor	Dia	Período (hh:mm)	Altura da Antena (m)	Diferenças (m)		RMS (m) (relativo)	Acurácia (m) ⁽³⁾	Correlação
				Média	Máxima			
FlexPak	27	17:30 - 07:10	0,160	0,000	0,157	0,00024	0,0758	0,9655
FlexPak	28 ⁽¹⁾	08:50 - 16:20	0,076	0,000	0,062	0,00043	0,0333	0,9987
FlexPak	28 ⁽¹⁾	08:45 - 16:37	0,160	0,082	-0,021	0,10453	0,0891	0,9988
Trimble	26	18:50 - 20:49	7,888	0,003	0,020	0,00418	0,0223	0,9750
Trimble	27	17:16 - 20:30	7,748	0,000	0,033	0,00018	0,0259	0,9910
Trimble	28	17:38 - 21:39	7,849	0,001	0,032	0,00086	0,0168	0,9970
Trimble	28 ⁽¹⁾	08:45 - 16:38	7,699	0,000	0,052	0,00010	0,0249	0,9986
Trimble	28 ⁽¹⁾	08:45 - 16:38	7,828 ⁽²⁾	0,129	-0,077	0,16364	0,1313	0,9986
C-Nav	26	18:46 - 08:24	8,102	-0,007	0,387	0,00703	0,2305	0,8360
C-Nav	27	17:17 - 07:14	8,070	-0,016	0,373	0,01485	0,2426	0,7569
C-Nav	28	17:53 - 09:10	8,165	-0,004	0,229	0,00377	0,1296	0,9052
C-Nav	28 ⁽¹⁾	08:45 - 16:37	8,174	0,000	0,188	0,00010	0,1284	0,9361
C-Nav	28 ⁽¹⁾	08:45 - 16:37	8,112 ⁽²⁾	-0,062	0,248	0,07875	0,1426	0,9360

NOTA: Análise realizada com base na estação maregráfica da Ponta da Armação.

(1) Período do levantamento batimétrico

(2) Altura média observada nos dias 26, 27 e 28 de julho

(3) Acurácia calculada ao nível de confiança de 95%.

As correções de marés GPS empregadas no cálculo das profundidades reduzidas estão grifadas em amarelo na Tabela 23. A exceção do sistema RTG C-Nav, os equipamentos RTK FlexPak e Trimble 7400 apresentaram acurácias compatíveis com levantamentos de Ordem Especial, de 3,3 e 2,5 cm, respectivamente, conforme pode ser visualizado nas FIGURAS 67 e 68. Observa-se que a altura da antena calculada para o receptor FlexPak não condiz com a realidade, uma vez que ela não estava próxima ao nível do mar, como indica o resultado obtido pelo método de GOLDAN. Uma das possíveis causas possa ser a inserção incorreta da altura da antena da estação de referência FlexPak, por ocasião

de sua instalação e configuração. Contudo este erro tem aspecto sistemático sobre as coordenadas verticais fornecidas pelo receptor a bordo, que é corrigido quando do cálculo da altura da antena, pelo método de GOLDAN, permitindo calcular corretamente as correções de marés GPS.

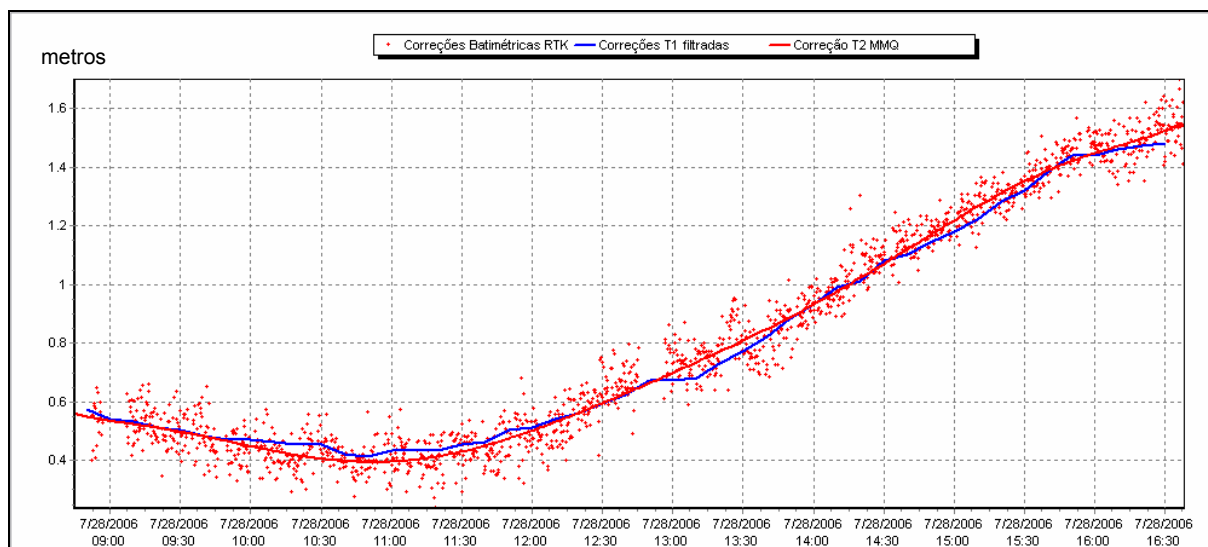


FIGURA 67 - CORREÇÕES T_2 RTK TRIMBLE X CORREÇÕES T_1 - SONDAGEM DIA 28/07/06

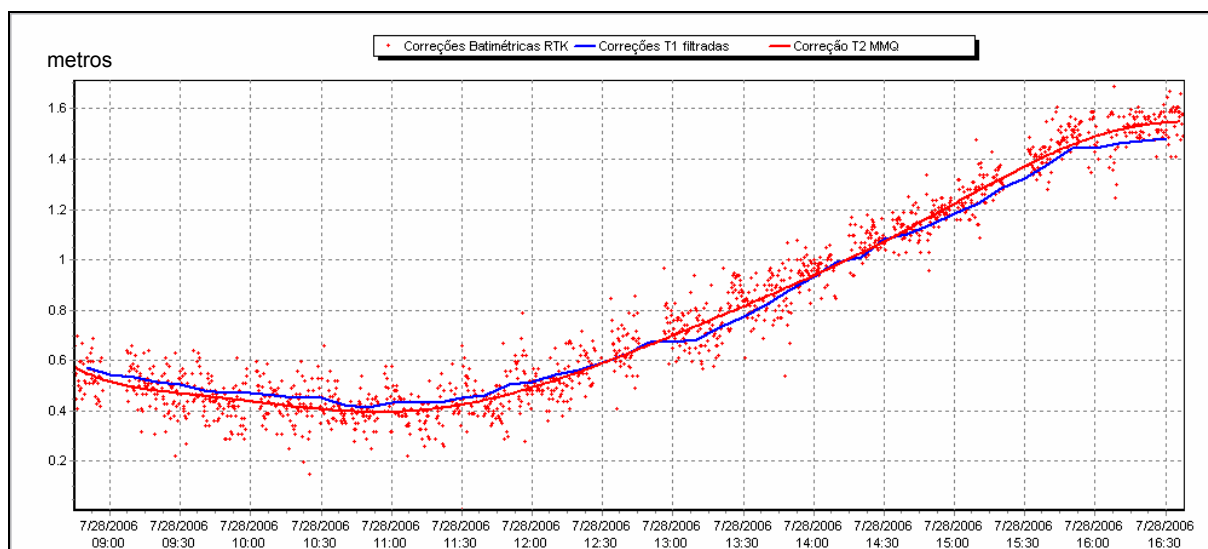


FIGURA 68 - CORREÇÕES T_2 RTK FLEXPAK X CORREÇÕES T_1 - SONDAGEM DIA 28/07/06

Apesar do sistema RTG C-Nav possuir uma boa precisão vertical, o sistema utilizado nesta pesquisa estava configurado para aplicações *offshore*, a grandes distâncias da costa, não contemplando o uso das correções de marés terrestres, cujo efeito pode ser melhor visto na FIGURA 90 da seção 4.4.3. Diferentemente dos sistemas RTK, o efeito das marés terrestres sobre o marégrafo não é percebido no

receptor móvel, gerando algumas diferenças em fase e amplitude entre a tendência da variabilidade de suas altitudes elipsoidais em relação ao comportamento do nível do mar descrito pelo marégrafo, conforme pode ser observado na FIGURA 69, quando comparada às altitudes elipsoidais fornecidas pelo receptor FlexPak no mesmo período (FIGURA 66).

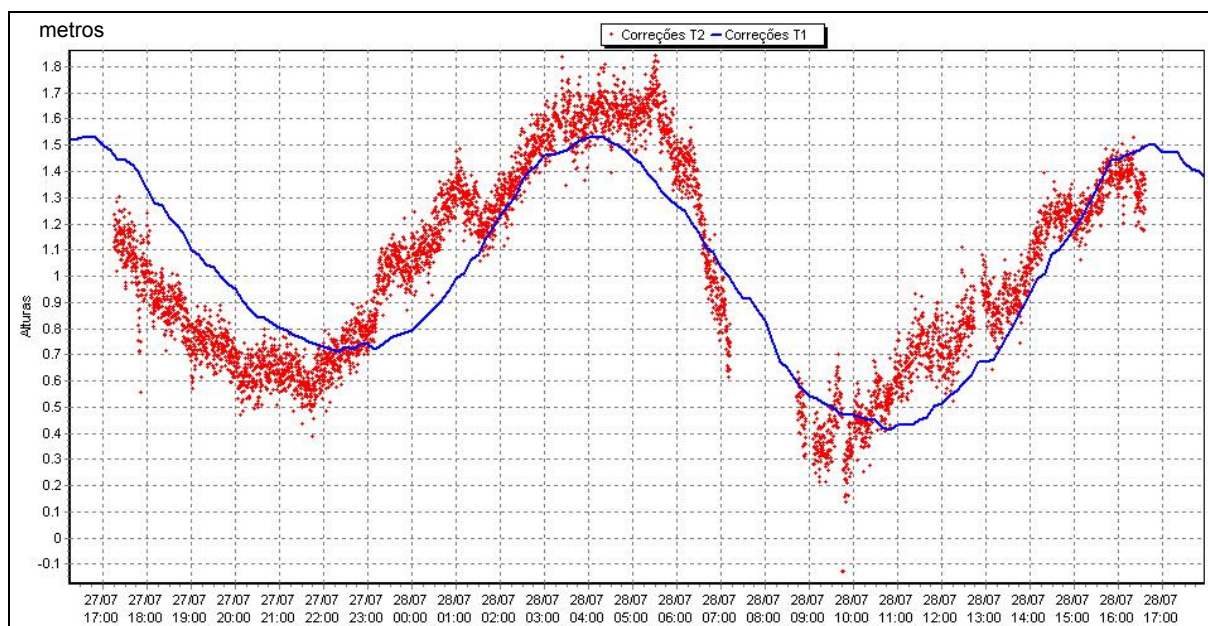


FIGURA 69 - CORREÇÕES DE MARÉS T₂ RTG C-NAV 2050M X T₁ - PONTA DA ARMAÇÃO

O uso do modelo matemático para cálculo das correções de marés GPS permite também estimar as correções de marés com grande acurácia mesmo onde não existam observações de altitudes elipsoidais. Isto pode ser observado nos resultados da análise do receptor RTK Trimble para o dia 28 de julho, quando houve uma perda de dados entre 20h28m e 20h52m devido à falta de soluções RTK fixas. Mesmo com um vazio de dados de cerca de 24 minutos, o modelo matemático foi capaz de gerar correções de marés GPS, a cada minuto (escolha do usuário do programa SIRBAT/GPS), sem comprometer a qualidade destas correções, conforme pode ser visto na FIGURA 70 e Tabela 23.

O método de GOLDAN permite o cálculo de alturas das antenas GPS a bordo de embarcações com grande acurácia, ou seja, erros sistemáticos mínimos, conforme a Tabela 23, permitindo obter correções de marés a partir de receptores GPS RTK altamente correlacionadas com as correções tradicionais, obtidas a partir das observações maregráficas. Entretanto, para sua aplicação, são necessárias observações maregráficas próximas à área de trabalho, o que por si só não

justificaria o emprego de receptores GPS RTK para obtenção de correções de marés. Porém para tornar a redução batimétrica independente das observações maregráficas, torna-se imprescindível a determinação precisa dos *offsets* das embarcações de sondagem, sobretudo as alturas dos locais de instalação das antenas GPS, por meio de métodos topográficos durante períodos de docagem, materializando um referencial fixo à embarcação, denominado linha d'água estática.

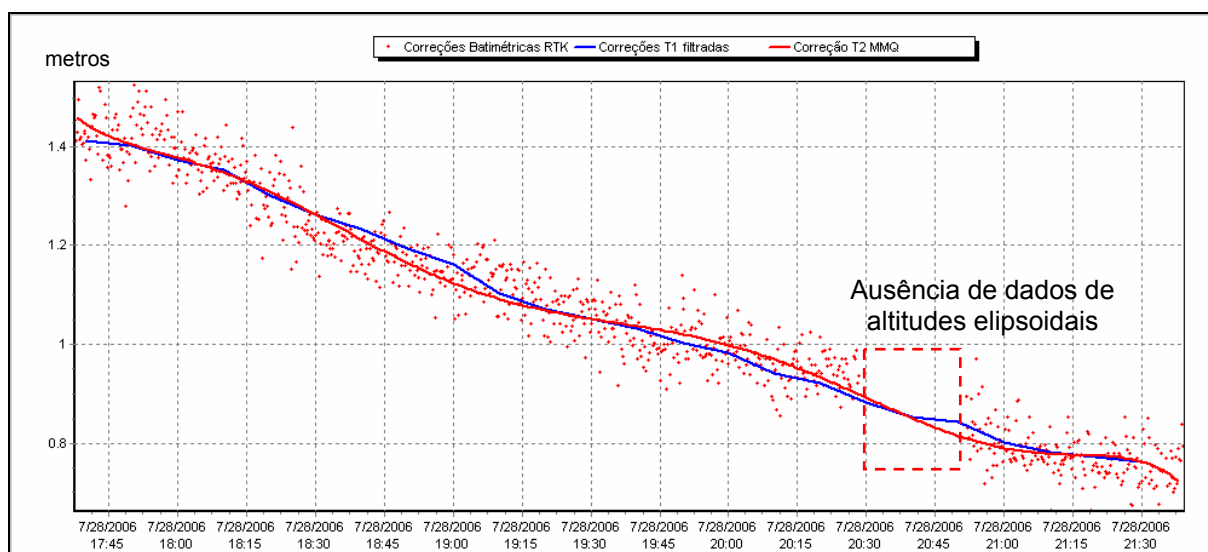


FIGURA 70 - CORREÇÕES DE MARÉS T_2 RTK TRIMBLE AJUSTADAS POR MÍNIMOS QUADRADOS COM MODELO MATEMÁTICO DA EQUAÇÃO HARMÔNICA DA MARÉ SIMPLIFICADA.

4.3 APLICAÇÃO E ANÁLISE DAS REDUÇÕES BATIMÉTRICAS

Verificado na seção anterior que as correções de marés GPS, a partir dos receptores RTK, atendem aos requisitos recomendados pela IHO para Levantamentos de Ordem Especial. Resta, portanto, analisar qual a sua contribuição dentro da qualidade do levantamento hidrográfico.

O ETP (Erro Total Propagado), abordado na seção 2.2.3, estabelece uma estimativa da precisão da sondagem baseada nos erros possíveis, considerados não correlacionados, para um determinado sistema de medida de profundidade. Entretanto seria desejável que a avaliação da qualidade de um levantamento hidrográfico estivesse baseada nas medidas redundantes coletadas na mesma área. A análise através das linhas de verificação permite uma estimativa da acurácia do levantamento, desde que os conjuntos de linhas de sondagem regular e de verificação tenham sido obtidos pela mesma plataforma de instrumentos, podendo-

se considerar que ambos tenham incertezas similares (USACE, 2004, p.4-10). A IHO recomenda que a análise das linhas de verificação seja realizada a fim de se confirmar a acurácia do posicionamento, das sondagens e dos procedimentos de redução batimétrica (IHO, 1998, p.14).

4.3.1 Aplicação das correções de marés

As correções de marés convencionais foram aplicadas às sondagens brutas através dos arquivos de correções gerados pelo editor *Manual Tides* (FIGURA 71) do programa HYPACK, onde foram introduzidas manualmente as alturas do nível do mar registradas pelos marégrafos, a uma taxa de amostragem de 10 minutos e relacionadas ao nível de redução. Através do método de interpolação *Spline*, são geradas as correções para cada minuto.

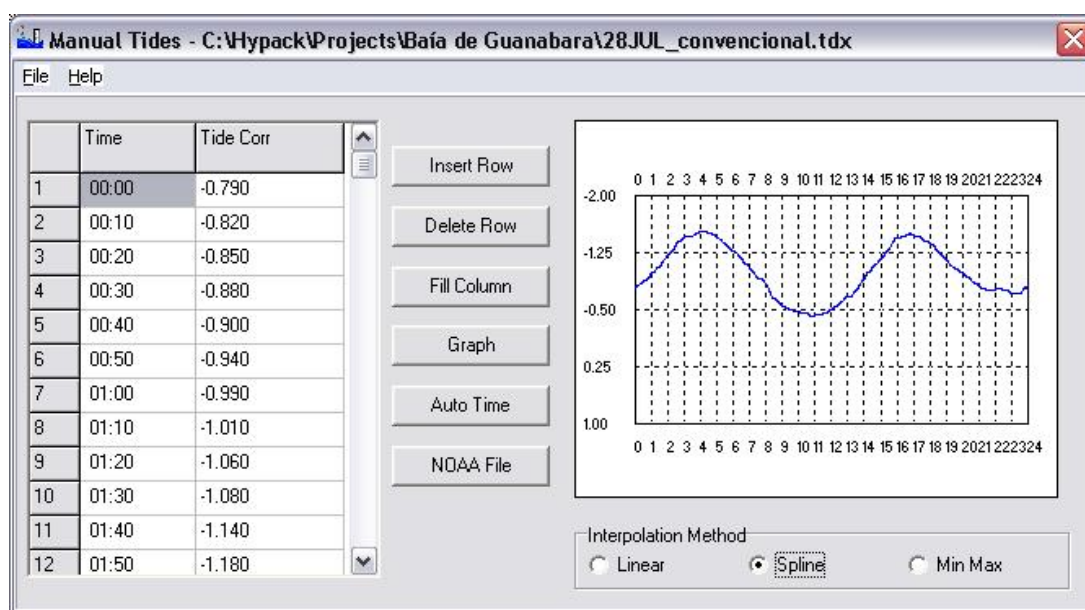


FIGURA 71 - PROGRAMA *MANUAL TIDES* PARA GERAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS

Os arquivos de dados brutos (*.RAW), gerados durante o levantamento batimétrico, foram processados pelo programa HYPACK para aplicação das correções descritas na seção 2.2. Admitindo-se que os dados brutos já contemplem as variações de velocidade do som, uma vez que o ecobatímetro foi devidamente calibrado através de observações diretas através do DIGIBAR-PRO (seção 3.2.7), o processamento compreendeu a aplicação das correções de atitude, correções de

offsets entre os sistemas de posicionamento (antenas GPS RTK/RTG), de medição de profundidade (transdutor) e sensores inerciais (TSS 335B), incluindo o período de latência para sincronização entre as sondagens e as posições, correções de marés T_1 baseadas nas estações maregráficas de referência, além de uma acurada eliminação de erros grosseiros batimétricos e de posicionamento, denominados *spikes* de posição ou de sondagem, representados por descontinuidades dos dados, conforme pode ser observado na FIGURA 72. Estes erros são tratados à luz dos registros dos ecogramas.

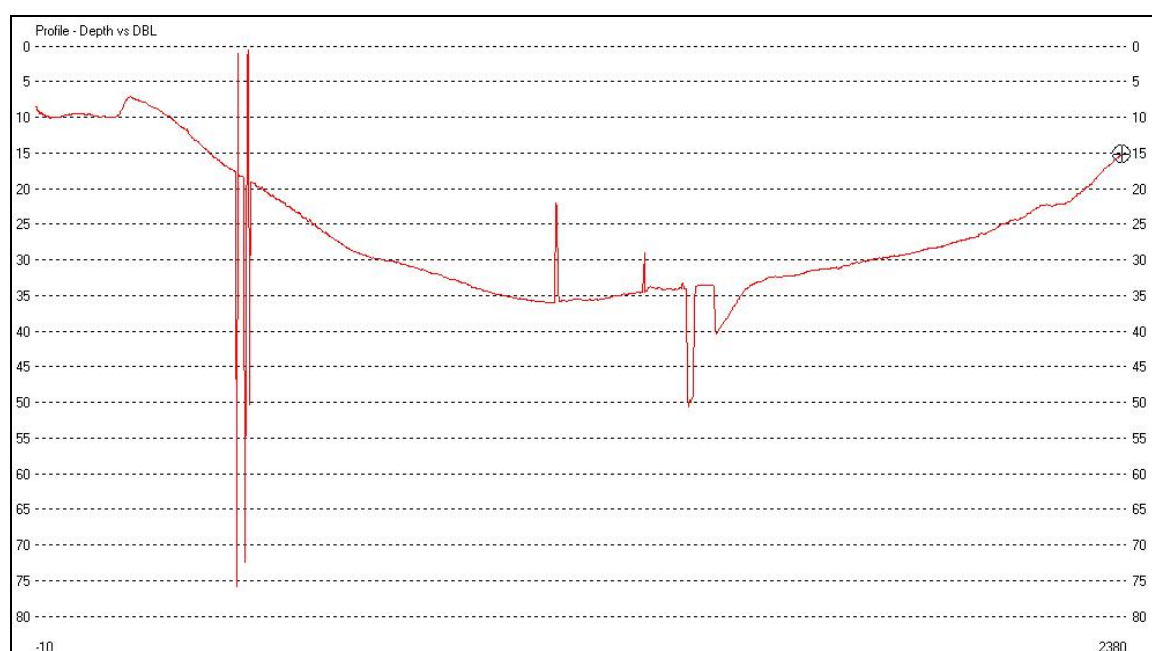


FIGURA 72 - SPIKES DE SONDAGEM DA LINHA EW6 (ARQUIVO 2006SO2091219_6.RAW) ASSOCIADAS AO RECEPTOR RTK TRIMBLE 7400 NO DIA 28 DE JULHO

Após este processamento os arquivos passam a ser denominados editados (*.EDT), e são novamente processados pelo programa SIRBAT/GPS para aplicação das correções de marés GPS às sondagens brutas. Como as sondagens foram gravadas a uma taxa de 1 segundo, também as correções de marés GPS são calculadas pelo modelo matemático, a partir dos parâmetros ajustados, para cada segundo.

4.3.2 Cálculo do Erro Total Propagado

A IHO recomenda, através de sua publicação S-44 (IHO, 1998) que sejam adotados modelos estatísticos para estimar o erro provável presente nos dados

hidrográficos. Estes modelos estatísticos estimam o ETP associado a cada sistema hidrográfico, envolvendo ecobatímetros, equipamentos de posicionamento e sensores inerciais. A preocupação com a determinação do ETP surgiu a partir do emprego dos ecobatímetros multifeixe, que permitem uma cobertura completa do fundo com grande acurácia. Entretanto esta acurácia pode ser contaminada pela qualidade dos sensores adicionais necessários, tais como unidades inerciais, perfiladores de velocidade do som, sensores giroscópicos e sistemas de posicionamento (COLLINS, 2004). A correta avaliação do ETP permite verificar se determinado sistema é capaz de alcançar os requisitos mínimos de qualidade para determinado tipo de levantamento.

A implementação de modelos estatísticos, através do programa CARIS HIPS, para aplicação em sistemas multifeixe tem sido estudada pelo CHM. A contribuição da metodologia de reduções batimétricas por GPS será avaliada de acordo com a expressão (2.39), aqui transcrita para facilitar o entendimento, e pelo modelo proposto por FERNANDES (2005), para análise de sistemas monofeixe.

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_{zc}^2 + \sigma_{zt}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{tide}^2} \quad (4.13)$$

onde σ_n^2 representa a variância da profundidade devido a incerteza n , que poderá ser :

zc - erro de medida da velocidade do som e à sua variação temporal e espacial;

zt - erro de medida do tempo de propagação do feixe acústico;

h - efeito *heave* medido e induzido sobre a posição do transdutor;

i - posição do transdutor, alterações de calado, efeitos de assentamento e *squat*;

r - erros de leitura dos registros do ecobatímetro e em função da sua resolução; e

$tide$ - erros de observação e redução dos efeitos de maré.

A incerteza relativa ao erro de medida da velocidade do som pode variar de 0,03 a 0,40 m, dependendo do processo de determinação da velocidade do som e da profundidade local (FERNANDES, 2005). A velocidade do som foi obtida por medida direta, através do DIGIBAR-PRO, estimando-se uma incerteza de 0,0017.P, igual a **0,039 m**, considerando a profundidade média da área de trabalho igual a 22,94 m. Não houve mudança espacial e temporal significativa na velocidade do

som, conforme apresentado na seção 3.2.7, dada a pequena extensão da área de pesquisa e a curta duração do levantamento (aproximadamente 8 horas durante o período diurno). Entretanto a calibração por medida direta pelo DIGIBAR-PRO²⁴ não permite confirmar o índice de calibração (expressão 2.37 e seção 2.2.3) do ecobatímetro, o que só pode ser realizado através do procedimento padrão empregando uma barra de calibração (USACE, 2004, p. 9-33).

Apesar do erro de medida do tempo de propagação do feixe acústico poder ser considerado absorvido no processo de calibração, considerou-se neste item a acurácia do ecobatímetro, fornecida pelo fabricante de $0,01 \text{ m} \pm 0,1\%$ da profundidade (ODOM, 2005, p.6). Aplicando o valor da profundidade média, tem-se uma incerteza de **0,033 m**.

O efeito *heave*, variações dinâmicas de calado e os efeitos de *squat* e assentamento, em função da velocidade de deslocamento, provocam variações verticais no transdutor. As variações de atitude apresentadas no gráfico da FIGURA 38 comprovam as boas condições de mar durante o levantamento, podendo-se assumir que as incertezas relativas a estas variações de calado são da ordem de **0,05 m**, de acordo com FERNANDES (2005). A posição do transdutor corresponde à informação de calado, ou seja, a distância vertical entre o transdutor e a superfície da água. Existem vários meios para se obter esta distância, entre elas, a barra de calibração, leituras das marcas de calado no costado da embarcação, consulta aos planos e medida direta, quando o transdutor é instalado pela borda. Este último tipo de instalação do transdutor foi empregado na pesquisa, e segundo FERNANDES (2005), a incerteza associada é de **0,05 m**.

Os erros de leituras dos registros de ecogramas não são aplicáveis nesta pesquisa, uma vez que foram utilizadas as informações digitais transmitidas pelo ecobatímetro e gravadas pelo programa HYPACK. Os ecogramas foram utilizados apenas para eliminação de erros grosseiros (*spikes*) dos dados batimétricos.

A contribuição das correções de marés baseadas em GPS para a estimativa do ETP está nas incertezas associadas à maré, dadas pela expressão (2.47), transcrita aqui novamente para melhor entendimento:

$$\sigma_{tide}^2 = \sigma_{tidem}^2 + \sigma_{NR}^2 + \sigma_{DRP}^2 + \sigma_{co-tidal}^2 \quad (4.14)$$

²⁴ O DIGIBAR modelo *Innerspace* 443 é capaz de calcular o índice de calibração (USACE, 2004, p. 9-33)

onde:

σ_{tidem}^2 - variância das observações de marés, tomadas nas estações maregráficas;

σ_{NR}^2 - variância da determinação do NR abaixo do nível médio no período padrão;

σ_{DRP}^2 - erros de arredondamento do DRP (Diagrama de Redução de Sondagens); e

$\sigma_{co-tidal}^2$ - variância dos erros cotidais, gerados pelas diferenças entre as marés na área de trabalho e aquela observada na estação maregráfica na costa.

Em função da resolução dos maregramas e dos resultados obtidos nos testes de *Van de Casteele* (seção 3.1.5), a incerteza relativa às observações de marés (σ_{tidem}^2), a partir das leituras do marégrafo da Ponta da Armação, é igual a **0,04 m**. Conforme apresentado na seção 2.2.1 a Instrução Técnica H-01 (DHN, 1998a) determina a elaboração dos DRP de modo que o erro máximo não exceda o decímetro. A interpolação *Spline*, utilizada pelo programa *Manual Tides Editor* do pacote de processamento do HYPACK, gera correções de marés com erro máximo de **0,03 m**. Os erros cotidais ($\sigma_{co-tidal}^2$) introduzidos na profundidade reduzida por considerar o nível do mar instantâneo na área de sondagem como igual ao mesmo nível registrado pelo marégrafo são estimados por FERNANDES (2005) em 0,08 m. Entretanto durante a realização dos testes de *Van de Casteele*, as observações simultâneas nas estações maregráficas da Ponta da Armação e Ilha Fiscal apresentaram uma diferença média de 0,19 m entre as correções de marés. Como a área de sondagem localiza-se exatamente entre estas duas estações maregráficas (FIGURA 23), considerou-se uma incerteza de **0,10 m**.

A incerteza associada a determinação da altura do NR (Z_0) abaixo do NMM (σ_{NR}^2) é obtida a partir de uma propagação de variâncias dos resíduos (Tabela 24) das constantes de amplitudes das componentes harmônicas principais da maré, gerados no processo de análise harmônica, considerando o modelo matemático apropriado para o cálculo de Z_0 , conforme apresentado na seção 2.1.4.2 pelas Tabelas 5 e 6. Segundo FERNANDES (2005), uma série temporal de observações maregráficas de tamanho superior a 365 dias, geraria uma incerteza na determinação do NR desprezível.

TABELA 24 – COMPONENTES HARMÔNICAS PRINCIPAIS (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO)

Nº	Componente	Frequência (ω°/h)	Amplitude (cm)	Resíduo (cm)	Fase (Graus)
1	M_2	28.9841042	33.35	0.19	83.45
2	S_2	30.0000000	18.53	0.19	88.87
3	N_2	28.4397297	4.09	0.19	125.09
4	K_2	30.0821381	5.68	0,19	82.26
5	O_1	13.9430351	10.92	0,19	87.15
6	K_1	15.0410690	5.99	0,19	144.43
7	P_1	14.9589310	2.27	0,19	130.26

FONTE: CHM (2006)

Pelo método de COURTIER (1938) para classificação da maré, as componentes acima descrevem uma maré semidiurna com desigualdades diurnas, conforme a Tabela 5.

$$C = \frac{H(O_1) + H(K_1)}{H(M_2) + H(S_2)} \Rightarrow C = 0,33 \quad (4.15)$$

O modelo matemático do cálculo do Z_0 para uma maré semidiurna com desigualdades diurnas é dado por BALAY (1952), em função do valor de $2K$, dado pela expressão (2.14), aqui transcrita para melhor entendimento:

$$2K = G(M_2) - [G(O_1) + G(K_1)] \quad (4.16)$$

De acordo com as constantes da estação maregráfica dadas pela Tabela 24, a característica da maré é semidiurna com grandes variações de amplitude, o que fica evidente no maregrama da FIGURA 39. Nesta situação o modelo matemático para o cálculo de Z_0 será, de acordo com a Tabela 6:

$$Z_0 = H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1) + H(P_1) \quad (4.17)$$

Aplicando-se uma propagação das variâncias a partir dos resíduos fornecidos pela Tabela 24, empregando o modelo matemático da expressão (4.1), tem-se uma variância associada à determinação do NR (Z_0) de **0,004 m**, praticamente desprezível, conforme FERNANDES (2005).

A Tabela 25 apresenta a estimativa do ETP obtido a partir dos métodos de redução batimétrica convencional e baseado nas variações das altitudes elipsoidais.

TABELA 25 - ERRO TOTAL PROPAGADO PREVISTO

INCERTEZAS VERIFICADAS	ETP ₁ (m)	ETP ₂ (m)
Erro na medida da velocidade do som	0,039	0,039
Acurácia do ecobatímetro	0,033	0,033
Efeito <i>heave</i> , variações dinâmicas de calado, <i>squat</i> e assentamento	0,050	0,050
Profundidade de imersão do transdutor	0,050	0,050
Processos associados a maré:		
Observações maregráficas	0,04	0,04
Aproximações do DRP	0,03	-
Erros cotidais	0,10	-
Estabelecimento do NR (Z ₀) abaixo do NMM	0,004	0,004
Tipo de Levantamento	Especial	1 ^a . Ordem
Erro Total Propagado (nível de confiança de 95%)	0,278	0,188
Erro Máximo Permitido (nível de confiança de 95%) - metros	0,303	0,582

NOTA: Os índices 1 e 2 dos valores do ETP referem-se aos erros estimados para o método convencional e GPS RTK / RTG, respectivamente.

Os valores foram calculados para a profundidade média de 22,94 m da área de pesquisa.

Como se pode notar da Tabela 25, um sistema hidrográfico composto pelo ecobatímetro monofeixe HYDROTRAC, versão 2.12, os receptores RTK / RTG e o sensor inercial, com correções maregráficas baseada na estação de referência da Ponta da Armação, resultou em um erro estimado de 0,278 m, e de 0,188 m, considerando as reduções batimétricas a partir das correções de marés geradas pelos receptores RTK. Desta forma, seria possível atender aos requisitos necessários para levantamentos de Ordem Especial. Entretanto a versão 2.12 do *firmware* do ecobatímetro HYDROTRAC não permitia a correção do índice de calibração (seção 3.2.4), que conseqüentemente não foi considerado no cálculo do ETP.

A maior contribuição no cômputo do ETP está nas correções referentes à maré. O emprego das altitudes elipsoidais precisas fornecidas pela técnica RTK contribui para minimizar estas incertezas, sobretudo reduzindo os erros cotidais, uma vez que o nível do mar é obtido no local exato do levantamento. O modelo matemático ajustado produz correções de marés para os instantes exatos de cada sondagem, evitando os problemas de arredondamento dos DRP.

A aplicação de correções de marés GPS também permite eliminar os erros decorrentes das oscilações verticais sofridas pela embarcação, provocadas pelo efeito *heave*, alterações dinâmicas de calado e interações hidrodinâmicas entre o

casco e a superfície da água em decorrência da velocidade (*squat* e assentamento), desde a altura da antena GPS RTK e a profundidade de imersão do transdutor estejam referidos ao mesmo ponto, materializado por processos topográficos. Para este trabalho, como as alturas das antenas foram obtidas pelo processo de GOLDAN, admite-se que as variações de calado introduzem erros no resultado final das profundidades reduzidas.

4.3.3 Análise das Linhas de Verificação

A determinação da acurácia em levantamentos hidrográficos não é tão simples quanto em levantamentos topográficos ou fotogramétricos, onde é possível uma redundância de dados muito maior, além da disponibilidade dos valores “verdadeiros” que podem ser determinados por outros métodos mais precisos. Diante da dificuldade de obtenção de medidas redundantes no mar, são realizadas linhas de verificação que cruzam as linhas de sondagem regular ortogonalmente, a fim de se gerar um segundo conjunto de observações, a partir da mesma plataforma de instrumentos, em instantes distintos.

A análise das linhas de verificação permite uma estimativa da acurácia do levantamento. Desta forma foram gerados 272 pontos de intersecção entre as linhas nos sentido N-S e E-W, ao longo de aproximadamente 8 horas de levantamento. Para a análise, admitiu-se um raio de busca de 2 m, igual a acurácia horizontal recomendada pela IHO para levantamentos de ordem especial. Isto significa que foram testados todos os pontos cuja diferença horizontal fosse inferior a 2 metros, verificando-se as diferenças entre suas respectivas profundidades reduzidas, obtidas pelas correções de marés convencionais (T_1) e através das altitudes elipsoidais ajustadas (T_2) através de cada um dos métodos apresentados na seção 4.2.

Os índices estatísticos considerados são baseados na diferença máxima, média (σ_{BLAS}) e desvio padrão (σ_{ERRO}) entre as profundidades reduzidas das linhas de sondagem regular e de verificação. O ideal é que a diferença média seja a menor possível, o que significará que os erros sistemáticos são mínimos. Alguns serviços hidrográficos admitem a inexistência de erros sistemáticos a partir de diferenças médias inferiores a 6 cm, porém na maioria das vezes os resultados obtidos encontram-se entre 3 e 1,5 cm. Contudo é necessário um número adequado de intersecções a fim de se garantir que esta média esteja dentro de um intervalo

compatível, ao nível de confiança de 95%. Sendo assim, buscou-se um máximo de pontos de cruzamento, utilizando todas as sondagens, coletadas a uma taxa de 1 segundo, associadas a soluções fixas RTK. Esta análise é então realizada através do SIRBAT/GPS (FIGURA 73), através dos arquivos editados (seção 4.3.1).

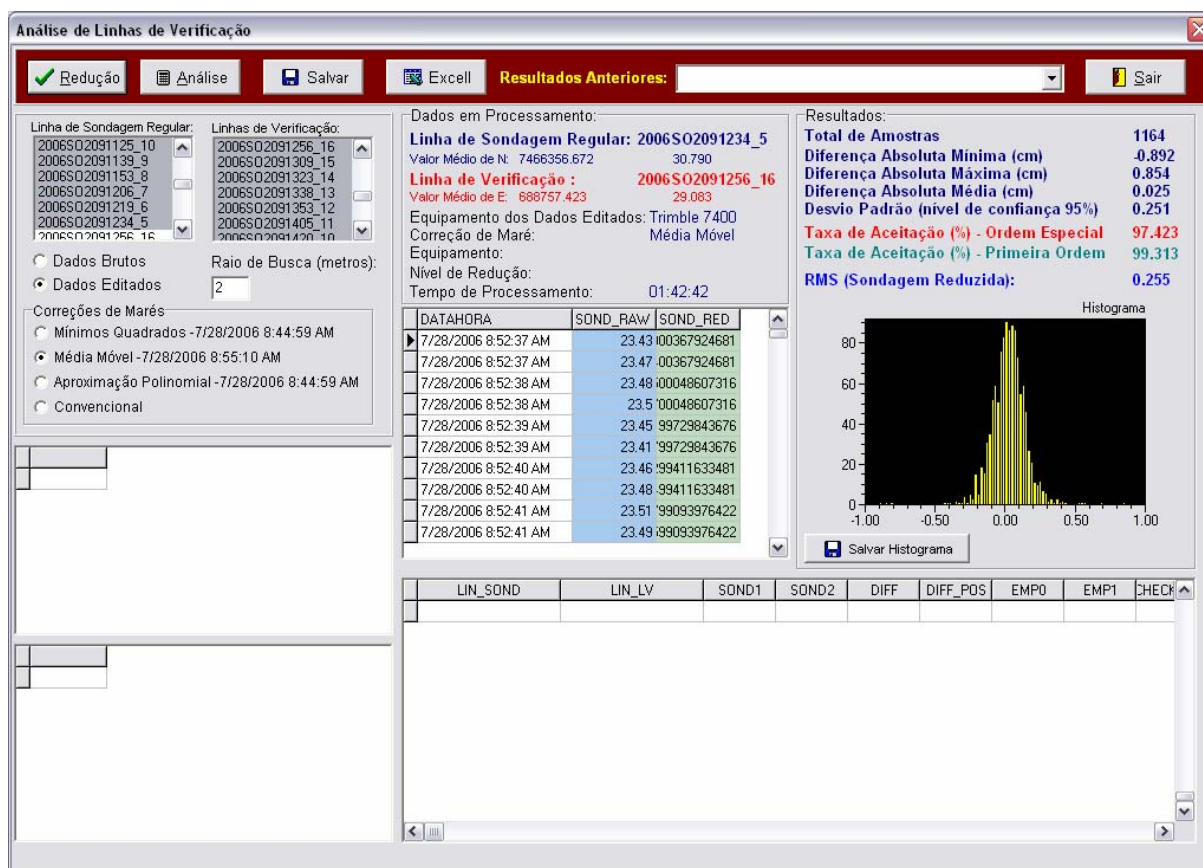


FIGURA 73 - ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PELO PROGRAMA SIRBAT/GPS

A acurácia estimada do levantamento, ao nível de confiança de 95%, é dada por (USACE, 2004, p.4-13):

$$RMS = 1,96 \cdot \sqrt{\sigma_{BIAS}^2 + \sigma_{ERRO}^2} \quad (4.18)$$

Também foram analisadas as taxas de aceitação para levantamentos de Ordem Especial e de Primeira Ordem, que corresponde à razão entre o número de pontos de intersecção cujas precisões ficaram abaixo do EMP (Erro Máximo Permitido), calculado, ao nível de significância de 95%, pela expressão (2.38), e a quantidade total de pontos verificados.

Foi realizado ainda um teste estatístico proposto por FERNANDES (2005), para verificar se as profundidades nos pontos de intersecção são estatisticamente iguais, a partir do ETP calculado previamente. Este teste é baseado na presumida distribuição normal das diferenças obtidas nos pontos de intersecção, e cuja estatística de análise é dada por:

$$\frac{|P_2 - P_1|}{ETP} < 1 \quad (4.19)$$

onde:

P_2 e P_1 são as profundidades reduzidas no ponto de intersecção correspondentes à linha de sondagem regular e à linha de verificação.

Para o ETP calculado na seção 4.3.2 as profundidades nos pontos de intersecção serão consideradas estatisticamente iguais, ao nível de significância de 95%, caso o módulo de sua diferença seja inferior a 0,278 m.

Os resultados das análises das linhas de verificação, armazenados no banco de dados Paradox empregado pelo programa SIRBAT/GPS, foram exportados para planilhas Excel a fim de melhor avaliar os dados e permitir a aplicação do teste estatístico entre profundidades reduzidas, apesar do SIRBAT/GPS também fornecer alguns índices estatísticos. Foram obtidos aproximadamente 1100 pontos de intersecção em cada análise, melhorando desta forma o intervalo de confiança da média dos erros determinados.

As diferenças entre os resultados apresentados na Tabela 26 representam a contribuição da componente da maré processada pelos métodos convencionais (T_1) e através das altitudes elipsoidais (T_2) fornecidas por cada receptor RTK / RTG a partir do processamento descrito na seção 4.2.4.

Nesta análise o EMP (Erro Máximo Permitido) associado a levantamentos de Ordem Especial foi de 0,305 m, e de 0,586, para levantamentos de Primeira Ordem, considerando uma profundidade média de 22,94 m da área de pesquisa. Desta forma, as acurácias estimadas (RMS) das profundidades reduzidas, ao nível de significância de 95%, obtidas a partir da redução batimétrica convencional, baseada no marégrafo da Ponta da Armação, para os sistemas RTK Trimble e RTG C-Nav atenderam aos padrões recomendados pela IHO para levantamentos de Ordem Especial, de acordo com a Tabela 1, como havia sido estimado pelo ETP.

TABELA 26 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DAS LINHAS DE VERIFICAÇÃO

	Correção	Total Pontos	Δd_m	Int. Conf. (95%)	Δd_{Max}	$2.\sigma$	RMS (95%)	Ordem ⁽¹⁾ Especial	1ª ⁽²⁾ Ordem	Teste ⁽³⁾ Estat.
Trimble	T ₁	1164	-0,007	$\pm 0,007$	0,83	0,249	0,250	97,42%	99,40%	96,99%
	T ₂ MMQ	1164	0,029	$\pm 0,007$	0,87	0,253	0,259	97,17%	99,31%	96,49%
	T ₂ MM	1164	0,025	$\pm 0,007$	0,85	0,251	0,255	97,42%	99,31%	96,65%
	T ₂ AP	1164	0,058	$\pm 0,007$	1,50	0,255	0,279	96,13%	99,31%	95,62%
FlexPak	T ₁	1121	-0,015	$\pm 0,022$	3,27	0,728	0,728	86,17%	96,16%	84,21%
	T ₂ MMQ	1113	0,044	$\pm 0,022$	3,35	0,733	0,738	85,09%	95,51%	83,92%
	T ₂ MM	1113	0,034	$\pm 0,022$	3,34	0,733	0,736	85,27%	95,69%	84,01%
	T ₂ AP	1113	0,048	$\pm 0,022$	3,36	0,731	0,737	85,09%	95,69%	83,92%
C-Nav	T ₁	1197	-0,014	$\pm 0,007$	0,81	0,246	0,248	97,49%	99,58%	97,08%
	T ₂ MMQ	1190	-0,051	$\pm 0,013$	0,84	0,450	0,460	80,08%	98,15%	77,65%
	T ₂ MM	1190	-0,049	$\pm 0,013$	0,85	0,445	0,455	79,91%	98,24%	77,82%
	T ₂ AP	1190	-0,014	$\pm 0,013$	0,92	0,450	0,451	80,76%	98,40%	78,08%

NOTA: Os valores de diferença média (Δd_m), diferença máxima (Δd_{max}), intervalo de confiança para a média, desvio padrão ($2.\sigma$) e a acurácia estimada (RMS 95%) estão em metros.

- (1) Percentual de pontos de intersecção cuja diferença entre as profundidades reduzidas ficou abaixo do EMP estabelecido para levantamentos de Ordem Especial.
- (2) Percentual de pontos de intersecção cuja diferença entre as profundidades reduzidas ficou abaixo do EMP estabelecido para levantamentos de Primeira Ordem.
- (3) Percentual de pontos de intersecção onde as profundidades reduzidas foram consideradas estatisticamente iguais em função do ETP calculado em 5.3.2.

As correções de marés processadas a partir das altitudes elipsoidais geradas pelo sistema RTK Trimble também permitiram a obtenção de profundidades reduzidas com qualidades compatíveis com levantamentos de Ordem Especial, o que já era esperado, dada a acurácia de aproximadamente 2,5 cm (Tabela 23) da tendência da variação de suas altitudes elipsoidais em relação aos valores observados no marégrafo. Apesar dos erros médios e desvio padrão ligeiramente superiores ao método convencional, o comportamento das diferenças entre as profundidades reduzidas por ambos os métodos é bem semelhante, conforme pode ser observado nos histogramas da FIGURA 74.

Todos os histogramas das diferenças entre as profundidades reduzidas obtidas pela aplicação das correções de marés convencionais (marégrafos), ou correções de marés GPS (altitudes elipsoidais), ajustadas pelos métodos apresentados nas seções 4.2.1 a 4.2.3, obtidas nas análises das linhas de verificação são apresentados no Apêndice 1.

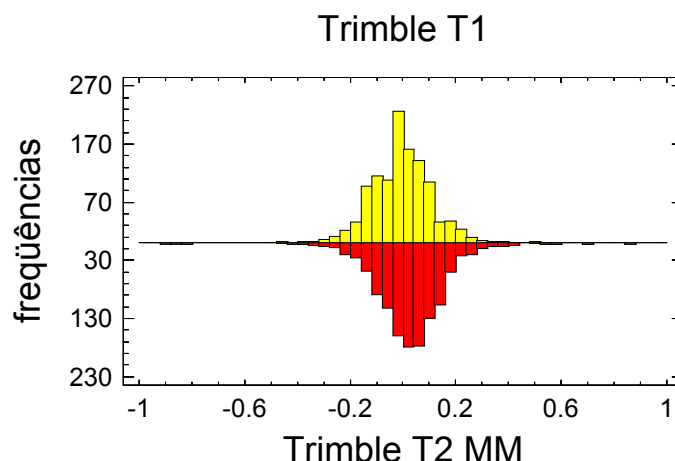


FIGURA 74 - HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T_1) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T_2) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTK TRIMBLE ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS

As diferenças de qualidade entre as profundidades reduzidas pelo método convencional e pelas altitudes elipsoidais RTG C-Nav podem ser observadas pelos histogramas da FIGURA 75.

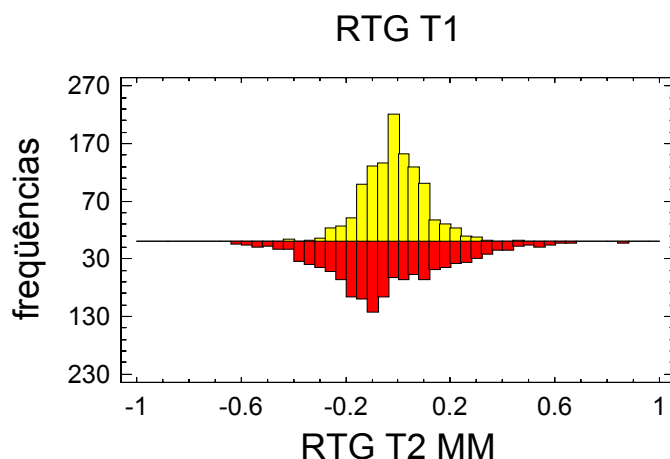


FIGURA 75 - HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T_1) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T_2) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTG C-NAV ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS

Nota-se na FIGURA 75 um aumento do erro médio (*bias*) e do desvio padrão das profundidades reduzidas pelas correções de marés T_2 do sistema RTG C-Nav, cujas acurácias estimadas permitiram apenas atender aos requisitos de levantamentos de Primeira Ordem, apesar da precisão de suas altitudes elipsoidais

(seção 4.4.3) ser semelhante ao sistema RTK Trimble. Isto pode ser explicado pela não aplicação das correções de marés terrestres às soluções de posição, resultando em uma diferença de fase e amplitude entre os registros do marégrafo na Ponta da Armação e a variação das altitudes elipsoidais, conforme pode observada na FIGURA 69. O efeito em se desconsiderar as correções de marés terrestres ao sistema RTG, quando empregado em áreas muito próximas de terra, pode ser observado na FIGURA 90.

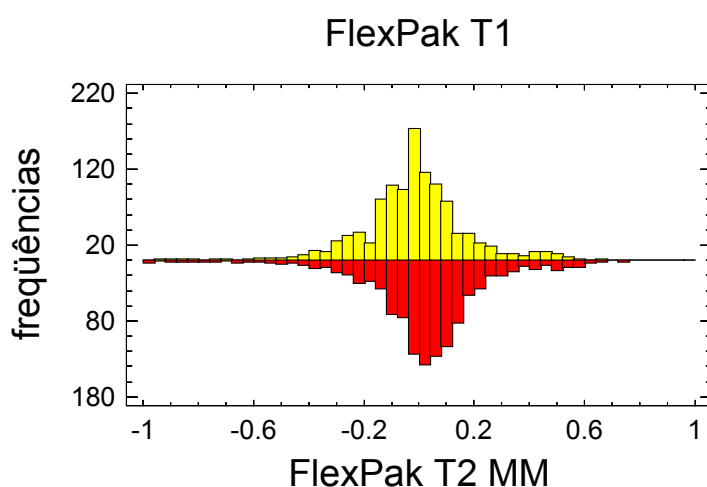


FIGURA 76 - HISTOGRAMA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS PROFUNDIDADES REDUZIDAS OBTIDAS A PARTIR DAS CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (T_1) E CORREÇÕES DE MARÉS GPS (T_2) PRODUZIDAS PELO SISTEMA RTK FLEXPAK ATRAVÉS DE FILTRAGEM POR MÉDIA MÓVEL (MM) DE 5 MINUTOS

Há ainda uma terceira situação, ocorrida com as profundidades reduzidas pelo sistema RTK FlexPak, que pode ser observada nos histogramas da FIGURA 76. Em todos os métodos de redução batimétrica (convencional e GPS) verificou-se um desvio padrão elevado de aproximadamente 70 cm, que apesar do erro médio abaixo dos 6 cm representativos da ausência de possíveis erros sistemáticos (Tabela 26), redundou em uma acurácia estimada inconsistente com levantamentos de Primeira Ordem. Isto pode ser atribuído às incertezas na determinação dos offsets entre a antena FlexPak e o transdutor do ecobatímetro, obtidos através de trena milimétrica e consulta aos planos da embarcação de sondagem. Conforme a FIGURA 27 a antena FlexPak era a mais distante do transdutor.

Os resultados do teste estatístico também demonstram que o ETP, previamente calculado está coerente com a acurácia estimada a partir das linhas de verificação. Assim pode-se admitir que a estimativa do ETP a partir do modelo

estatístico proposto está coerente com a realidade verificada em campo. A não correção do índice de calibração do ecobatímetro aparentemente parece não ter prejudicado a qualidade do levantamento.

Do exposto anteriormente podem-se destacar três situações distintas de resultados, sendo uma para cada sistema de posicionamento empregado:

- Sistema RTK Trimble, as correções de marés GPS processadas a partir da variação das altitudes elipsoidais produziram profundidades reduzidas compatíveis com levantamentos de Ordem Especial, validando o emprego desta metodologia GPS nas reduções batimétricas em áreas costeiras;
- Sistema RTG C-Nav configurado para operações *offshore*, empregando as correções do tipo 11, *StarFire RTG dual freq - no "Tide" Adjusted* (C&C TECHNOLOGIES, 2005), atendeu apenas aos requisitos de Primeira Ordem, sendo necessário ainda avaliar o seu emprego em levantamentos oceânicos ou em regiões em que a técnica RTK não é viável, e distantes das estações maregráficas de referência, tais como a Barra Norte do Rio Amazonas. Outra hipótese é a aplicação do sistema, com correções de marés terrestres, em levantamentos costeiros ou em água interiores. Entretanto esta última não é justificada dado o seu alto custo, considerando que o sistema RTK atende aos requisitos de Ordem Especial nestas áreas; e
- Sistema RTK FlexPak cuja análise foi prejudicada pela dificuldade na determinação correta do alinhamento absoluto entre sua antena e o transdutor do ecobatímetro, em função do afastamento excessivo entre ambos. Este problema reforça a necessidade da adoção de procedimentos rigorosos de alinhamento absoluto e relativo dos sensores envolvidos em levantamentos hidrográficos, quando aplicada a metodologia de reduções batimétricas GPS, sobretudo a altura da antena GPS sobre um ponto de referência materializado a bordo. Deve-se também buscar instalar as antenas GPS em um local que proporcione boas visadas, tanto para a estação de referência quanto à constelação de satélites, e o mais próximo possível do local da vertical do transdutor do ecobatímetro.

Foram adotadas algumas simplificações para aplicação da metodologia de reduções batimétricas por GPS. Entre elas está o cálculo da altura das antenas GPS por meio do método de GOLDAN, que vincula as altitudes elipsoidais às observações maregráficas de uma estação de referência, notadamente observado pelas altas correlações descritas na Tabela 23. Como consequência está a pouca

variação nos valores de RMS das profundidades reduzidas pelas correções de marés T_2 . Tanto para o cálculo da distância vertical entre o NR local e o elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, quanto na aplicação das próprias correções de marés convencionais pelo DRP, o NR é considerado constante. Isto é possível dada a pequena extensão da área e a diferença entre os valores de Z_0 de cada estação maregráfica de apenas 2,3 cm. Entretanto, a grande vantagem das correções de marés T_2 está em levantamentos realizados em áreas mais afastadas das estações maregráficas de referência, desde que haja um estudo prévio do comportamento do nível de redução nesta área em relação ao elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, através de modelagem numérica e realizações de fundeios em vários pontos no interior da área, além de um rigoroso alinhamento absoluto e relativo entre os sensores da embarcação de sondagem.

Tais simplificações não comprometem o resultado da pesquisa, uma vez que as alturas das antenas e as sondagens foram referidas à linha d'água da embarcação, que em função do seu pequeno porte, curta duração das operações no mar e as poucas variações de atitude, permitem considerá-la constante para efeito de redução batimétrica. As características das marés observadas nas duas estações maregráficas de referência também possibilita considerar constante o NR no interior da área de trabalho. Contudo fazem-se necessárias mais investigações em levantamentos onde as condições de emprego das correções de marés GPS as tornem não tão correlacionadas com as observações maregráficas costeiras, tais como significativas mudanças de atitude da embarcação de sondagem, áreas mais afastadas de estações maregráficas e com regimes de marés mais complexos.

4.4 ANÁLISE DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO RTK / RTG E DGPS

A análise da acurácia de uma plataforma móvel no mar não é uma tarefa simples, uma vez que exige a obtenção de pontos de controle mais acurados, tomados como “verdadeiros” para comparação com as posições observadas. Foi empregada a metodologia apresentada por BRIONES (1999) e WELLS²⁵ (2006), onde as posições observadas são comparadas a trajetórias padrão, compostas por pontos determinados a partir do processamento relativo cinemático das observações brutas GPS, gravadas a uma taxa de 1 segundo pelos receptores Ashtech Z-XII, e de 3 segundos pelo sistema Leica GX1230, durante todo o período do levantamento hidrográfico do dia 28 de julho. O processamento foi realizado pelo programa *Ashtech Solutions*® versão 2.60, a partir da estação base GUAR (Tabela 15), empregando-se efemérides precisas e uma máscara de elevação de 15°. A fim de garantir maior confiabilidade nas trajetórias padrão foram consideradas apenas as soluções de ambigüidades fixas, gerando um total de 18.085 pontos.

As posições observadas foram obtidas a partir das mensagens NMEA \$GPGGA (seção 2.4.1.3) de cada equipamento (Trimble, FlexPak e C-Nav) gravadas nos arquivos brutos (*.RAW) (Tabela 21) coletados pelo HYPACK durante a sondagem (FIGURA 36), corrigidas através de planilhas do programa *Microsoft Excel 2003*, de acordo com a FIGURA 81. Em função da precisão decimétrica dos três receptores supracitados, era necessário efetuar a redução de excentricidade de suas respectivas antenas com relação à posição das antenas dos receptores Ashtech Z-XII ou Leica GX1230, a fim de se eliminar erros sistemáticos. A distribuição das antenas a bordo pode ser visualizada nas FIGURAS 27 e 28. Muito embora o programa HYPACK permita executar uma correção de *offsets* para alinhamento absoluto e relativo entre os sensores (seção 2.1.5), este procedimento introduz nas coordenadas corrigidas uma defasagem de tempo na ordem do décimo de segundo, que quando associada à velocidade média da embarcação de sondagem (aproximadamente 3 m/s), produz erros de até dois metros em relação aos pontos da trajetória padrão, cujas coordenadas são definidas no instante referido ao segundo inteiro.

²⁵ Comunicação pessoal (17 de maio de 2006)

Os índices estatísticos que sumarizam as análises foram o erro máximo (maior desvio encontrado em relação a coordenada padrão), erro médio (média das diferenças em relação às coordenadas padrão), desvios padrão dos erros obtidos e erro médio quadrático (R.M.S.), ao nível de significância de 95%, para as componentes em latitude, longitude e altitude. Segundo REMONDI et al. (2000) a precisão das altitudes elipsoidais pode ser obtida pela diferença entre duas épocas consecutivas. Desta forma são apresentadas ainda a precisão das altitudes e a acurácia 2dRMS de cada receptor.

As análises consideram apenas o período do levantamento batimétrico do dia 28 de julho, verificando se o posicionamento atende aos requisitos de qualidade recomendados pela IHO durante operações no mar, de acordo com a Tabela 1, aqui transcritos para melhor entendimento.

TABELA 27 - REQUISITOS DE QUALIDADE DA IHO PARA O POSICIONAMENTO HORIZONTAL

Ordem	Especial	1	2	3
Acurácia Horizontal	2 m	5 m + 5% da profundidade	20 m + 5% da profundidade	150 m + 5% da profundidade
Perigos à navegação fixos e feições significativas à navegação	2 m	2 m	5 m	5 m
Linha de costa natural	10 m	20 m	20 m	20 m
Posição média de auxílios à navegação flutuantes	10 m	10 m	20 m	20 m
Feições topográficas	10 m	20 m	20 m	20 m
Pontos de controle horizontal primário na costa				10 cm
Pontos de controle horizontal secundário na costa				50 cm

FONTE: IHO (1998)

Esta análise visa confirmar a acurácia horizontal e vertical dos sistemas RTK, assim como verificar a performance do sistema RTG C-Nav, empregado pela primeira vez em levantamentos hidrográficos no Brasil. Em nenhuma hipótese o objetivo foi discutir qual dos três sistemas é o melhor, uma vez que seria necessário analisar outros parâmetros como multicaminho e relação sinal ruído em cada antena, e para isso, as três antenas deveriam estar instaladas no mesmo ponto a bordo da embarcação de sondagem. Foram empregados três diferentes equipamentos de alta precisão apenas para garantir a coleta dos dados com uma certa margem de segurança.

Os sistemas DGPS Ashtech Z-XII, com base no ponto GUAR, e Trimble NT200D com estação de referência próxima ao Radiofarol da Ilha Rasa também foram analisados quanto à sua acurácia horizontal. As altitudes destes últimos sistemas não serão analisadas, uma vez que sua qualidade, apresentada por BRIONES (1999), não atende ao propósito desta pesquisa.

A Tabela 28 sintetiza as comparações que foram realizadas para as análises de acurácia de cada equipamento empregado nesta pesquisa.

TABELA 28 - COMPARAÇÕES REALIZADAS PARA ANÁLISES DE ACURÁCIA

Coordenadas Padrão	Taxa de gravação	Coordenadas Observadas	Amostras	Dia	Período (hh:mm:ss)
Ashtech Z-XII	1 segundo	RTK Trimble	18086	28/07/06	08:52:37 - 16:38:07
Ashtech Z-XII	1 segundo	RTG C-Nav	18083	28/07/06	08:52:37 - 16:38:07
Ashtech Z-XII	3 segundos	DGPS Trimble NT200D	2604	26/07/06	13:29:16 - 17:01:25
Ashtech Z-XII	3 segundos	DGPS Ashtech Z-XII	1487	26/07/06	13:29:16 - 15:02:49
Leica GX1230	3 segundos	RTK FlexPak	7677	28/07/06	08:46:49 - 16:38:04

4.4.1 Redução das excentricidades entre as antenas a bordo

A redução das excentricidades (offsets) visa à eliminação dos erros sistemáticos decorrentes do posicionamento relativo entre as antenas observadas (Trimble e FlexPak) e a padrão (Ashtech Z-XII e Leica GX1230). Assim como no cálculo das diferenças entre as coordenadas observadas e os valores padrão, é necessário o conhecimento do comprimento dos arcos de 1" ($4,8416 \cdot 10^{-6}$ rad) em latitude e longitude sobre o elipsóide, dado por (RICHARDUS e ADLER, 1972, p.41):

$$ds^2 = M^2 \cdot d\varphi^2 + N^2 \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\lambda^2 \quad (4.20)$$

onde:

M - raio de curvatura da seção meridiana;

N - raio de curvatura da seção 1º vertical;

φ - latitude média local;

$d\varphi$ - arco de deslocamento infinitesimal em latitude; e

$d\lambda$ - arco de deslocamento infinitesimal em longitude.

Substituindo os parâmetros de semi-eixo maior (6.378.137 m) e achatamento (1/298,257223563) do elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150, obtém-se os comprimentos dos arcos de 1 segundo em latitude e longitude, para a latitude média da área de trabalho (22° 53' 19",51724 S):

$$\begin{aligned} d\varphi(1'') &= 30,72717957 \text{ metros} \\ d\lambda(1'') &= 28,56169759 \text{ metros} \end{aligned} \quad (4.21)$$

A redução das excentricidades de cada receptor analisado foi calculada a partir do ângulo (α) definido pela direção percorrida entre duas coordenadas sucessivas nos instantes t_i e t_{i+1} , com base nos comprimentos dos vetores transversais (*offsets*) das antenas dos receptores Trimble e FlexPak em relação às antenas dos receptores Ashtech Z-XII e Leica GX1230, respectivamente, conforme a disposição apresentada na FIGURA 27. Como o intervalo entre os instantes é de 1 segundo, podem-se considerar desprezíveis os efeitos dos ventos e correntes de marés, sendo o sentido do deslocamento ortogonal a verga da embarcação de sondagem.

A FIGURA 77 apresenta um exemplo da geometria utilizada para a redução de excentricidade entre as antenas Trimble e Ashtech, durante os deslocamentos no sentido Leste-Oeste.

Como as reduções dependem da direção do deslocamento entre dois instantes, as excentricidades são corrigidas apenas a partir do segundo ponto (instante t_2). Portanto as coordenadas Trimble (TRM) corrigidas para a posição da antena padrão (ASH), no instante t_{i+1} , será:

$$\begin{aligned} \lambda_c^{i+1} &= \lambda_0^{i+1} - d\lambda \\ \varphi_c^{i+1} &= \varphi_0^{i+1} + d\varphi \end{aligned} \quad (4.22)$$

onde:

$(\varphi_c^{i+1}, \lambda_c^{i+1})$ - coordenadas geodésicas latitude e longitude reduzidas para a posição da antena padrão no instante t_{i+1} ;

$(\varphi_0^{i+1}, \lambda_0^{i+1})$ - coordenadas geodésicas latitude e longitude originais no instante t_{i+1} ; e

$(d\phi, d\lambda)$ - arcos de latitude e longitude, em metros, sobre o elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150, decorrentes das diferenças entre os pontos de instalação das antenas analisadas (Trimble e FlexPak) e as antenas padrão (Ashtech e Leica). No caso dos receptores RTG C-Nav e FlexPak, cujas antenas estão localizadas a bombordo de suas respectivas antenas padrão (FIGURAS 27 e 28), a correção de longitude ($d\lambda$) será positiva, enquanto a correção de latitude ($d\phi$) será negativa.

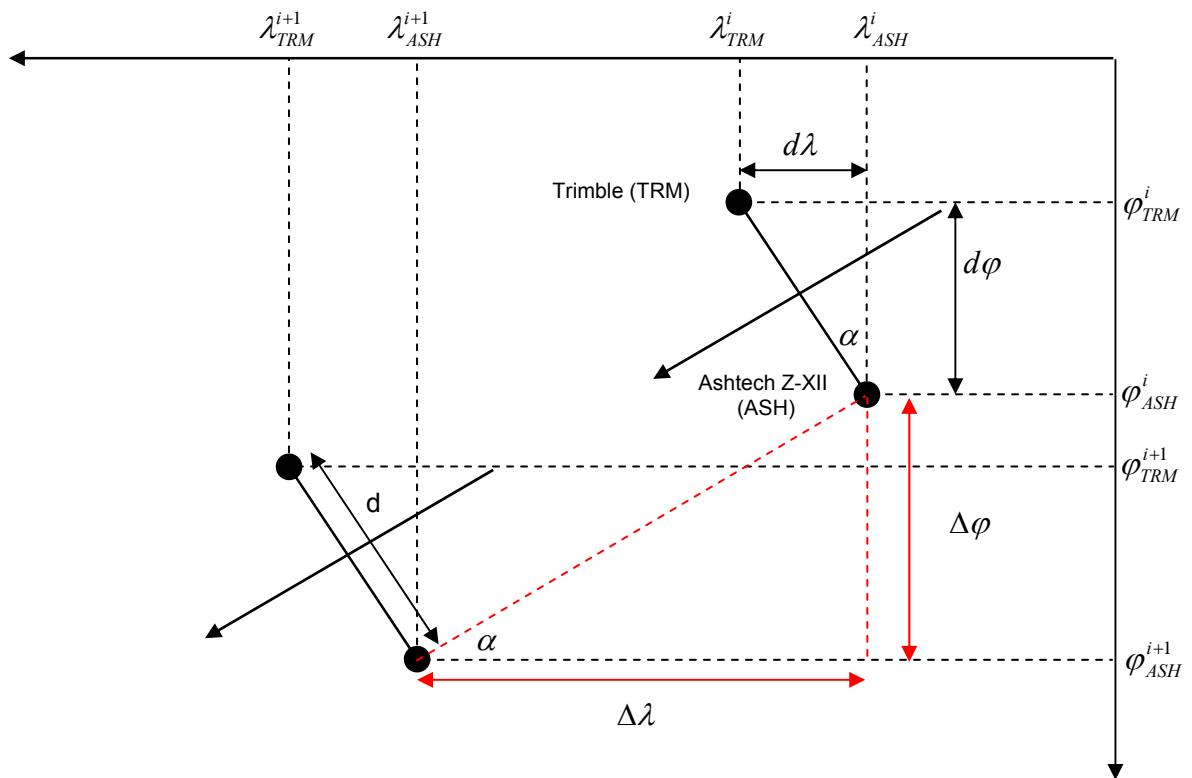


FIGURA 77 - REDUÇÃO DAS EXCENTRICIDADES ENTRE AS ANTENAS GPS DURANTE O DESLOCAMENTO NO SENTIDO LESTE-OESTE

As correções $(d\phi, d\lambda)$ são calculadas em função dos *offsets* transversais entre as antenas, medidos por trenas milimétricas, cujos valores são apresentados na FIGURA 28, e da direção α percorrida entre dois instantes sucessivos. Logo:

$$\begin{aligned} d\phi &= d \cdot \cos \alpha \\ d\lambda &= d \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (4.23)$$

onde:

d é a distância, obtida por medida direta com trena milimétrica, entre a antena do receptor analisado e a antena do receptor que fornecerá as coordenadas padrão. A instalação a bordo procurou dispor todas as antenas lateralmente entre si, de modo a eliminar possíveis *offsets* longitudinais; e

α é o ângulo entre o paralelo correspondente à latitude da antena do receptor de referência no instante t_{i+1} e o vetor formado por duas posições sucessivas da mesma antena. É dado pela expressão (4.24).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \quad (4.24)$$

sendo $\Delta\varphi$ e $\Delta\lambda$ arcos de latitude e longitude, em metros, referentes ao deslocamento da embarcação entre os instantes t_i e t_{i+1} . São obtidos a partir dos comprimentos de arco de 1" em latitude e longitude determinados em (4.21) através das expressões:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= (\varphi_{ASH}^{i+1} - \varphi_{ASH}^i) d\varphi(1'') \\ \Delta\lambda &= (\lambda_{ASH}^{i+1} - \lambda_{ASH}^i) d\lambda(1'') \end{aligned} \quad (4.25)$$

São discutidos a seguir os cálculos realizados e os resultados obtidos da análise de acurácia do posicionamento da embarcação de sondagem, empregando os sistemas RTK Trimble e FlexPak, RTG C-Nav e DGPS.

4.4.2 Análise de acurácia dos sistemas RTK

Visando obter a máxima qualidade nas soluções de posição da embarcação buscou-se que a linha de base (LB) formada entre os receptores móveis e suas respectivas estações de referência (pontos PILA e PDAR - Tabela 15) fosse a menor possível. Neste trabalho as LB variaram de 330 a 3580 m. Esta qualidade é de extrema importância quando se almeja obter uma melhor análise da redução batimétrica baseada nas variações das altitudes elipsoidais.

Os gráficos das FIGURAS 78 e 79 apresentam parâmetros de qualidade das soluções de posição RTK FlexPak e Trimble.

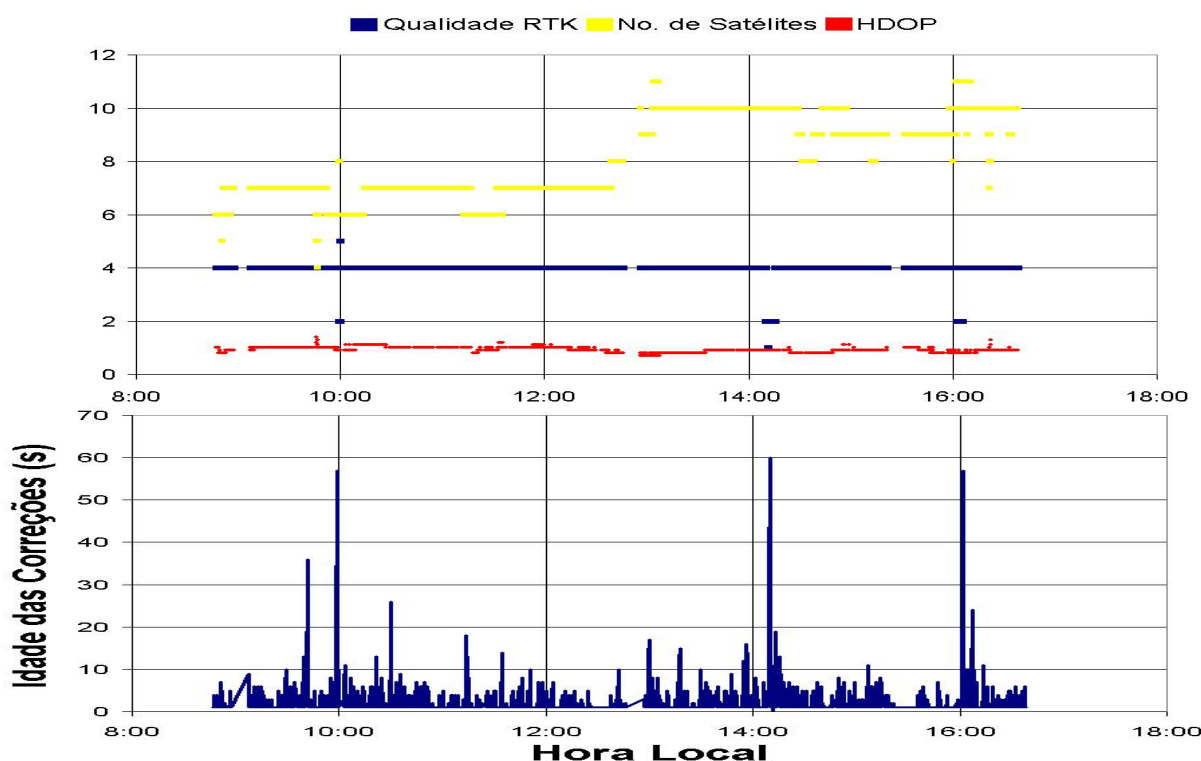


FIGURA 78 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTK FLEXPAK DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28 DE JULHO.

O gráfico superior da FIGURA 78, referente ao sistema FlexPak, apresenta os parâmetros de qualidade da solução RTK fornecida (Qualidade RTK), HDOP, número de satélites observados. No gráfico inferior observam-se as idades das correções transmitidas pela estação de referência. Estes dados foram obtidos através das mensagens NMEA \$GPGGA gravadas nos arquivos brutos do programa HYPACK durante o levantamento batimétrico do dia 28 de julho.

A análise conjunta destes parâmetros indica uma boa qualidade das posições RTK FlexPak, que durante a maior parte tempo (97,24%) foram determinadas a partir de soluções fixas (índice de qualidade 4) das ambigüidades. Este índice varia de acordo com o modelo de receptor. No sistema RTK FlexPak, as soluções de posição podem ser qualificadas de acordo com os índices dados pela Tabela 29.

A idade média das correções foi de 2 segundos, com alguns períodos de aproximadamente um minuto, como às 09h57, 14h09 e 16h01, quando ocorreram atrasos de até 60 segundos provocados por algum problema de comunicação. Nestas ocasiões a solução de posição passou a ser do tipo 2 (Tabela 29), voltando ao tipo 4 (Tabela 29) após uma média de 3 minutos. A quantidade de satélites

manteve-se entre 7 e 10, garantindo baixos valores para o fator HDOP, em média igual a 0,92.

TABELA 29 - ÍNDICES DE QUALIDADE DAS SOLUÇÕES RTK FLEXPAK

Índice	Indicador de Qualidade GPS
0	Solução não disponível ou inválida
1	GPS fix - solução de posicionamento absoluto
2	Posição GPS diferencial a partir de correções da pseudodistância
4	Posição GPS fixa (determinação das ambigüidades inteiras)
5	Posição GPS <i>float</i> (não determinação das ambigüidades inteiras)

FONTE: (NOVATEL, 2004)

Não foi possível a análise da idade dos dados transmitidos pela estação de referência do sistema Trimble porque as mensagens NMEA empregadas não forneciam este parâmetro. O gráfico da FIGURA 79 apresenta apenas os dados de HDOP, número de satélites observados e qualidade das soluções fornecidas.

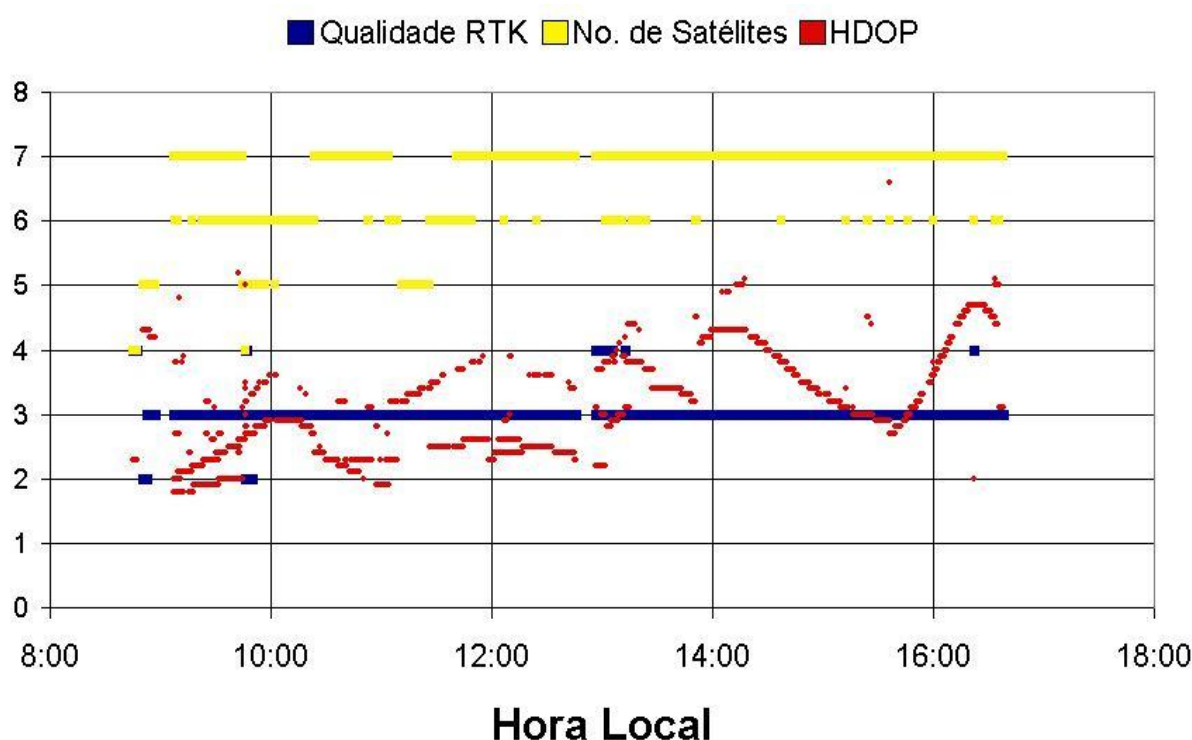


FIGURA 79 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28 DE JULHO.

O sistema RTK Trimble proporcionou uma disponibilidade de soluções fixas (índice de qualidade 3) durante 98,05% do tempo de trabalho. Os índices 2 e 4 correspondem a soluções DGPS baseadas em correções diferenciais a partir do código, e soluções *float* obtidas a partir das observações brutas de fase e código

(mensagens RTCM 18 e 19) transmitidas pela estação de referência. A quantidade de satélites observados variou entre 4 e 7, mantendo um total de 7 satélites durante 78,65% do levantamento. Este número é muito próximo do mínimo de 5 satélites recomendável para o posicionamento diferencial. Como não se pôde observar a idade das correções transmitidas, observam-se degradações de qualidade do posicionamento (índices 2 e 4). Às 8h50 houve uma certa demora, a partir do instante quando foi ligado, para o receptor adquirir o número de satélites suficientes para obtenção de soluções fixas. Às 12h57, em função de uma diminuição do número de satélites, houve algumas soluções flutuantes. O fator HDOP manteve-se em média igual 3,1.

Verificou-se, através dos gráficos das FIGURAS 78 e 79, que os sistemas RTK FlexPak e Trimble apresentam parâmetros indicadores de boa qualidade em suas soluções de posição. Estas posições (qualidade fixa) foram comparadas com as coordenadas padrão.

Os dois conjuntos de coordenadas (padrão e observadas) foram referidos ao mesmo instante de tempo, através do programa SIRBAT/GPS, já que havia muita descontinuidade em ambos os registros, em função de interrupções na gravação dos dados para mudanças de linha de sondagem e filtragem das coordenadas, para se avaliar apenas as soluções fixas fornecidas tanto pelo programa Ashtech Solutions v. 2.60 (valores padrão), quanto pelos receptores RTK (valores observados).

A FIGURA 80 apresenta um trecho da planilha empregada na análise dos dados do sistema RTK Trimble.

DATA HORA	RTK TRIMBLE								ASHTECH PÓS-PROCESSADO						
	LATITUDE				LONGITUDE				ALTITUDE	LATITUDE			LONGITUDE		
	GG	MM	SS.SSS	SS CORR	GG	MM	SS.SSS	SS CORR		GG	MM	SS.SSS	GG	MM	SS.SSS
7/28/2006 8:52:37	22	52	42.416917		43	9	7.38781		1.529	22	52	42.42686	43	9	7.38839
7/28/2006 8:52:38	22	52	42.429065	42.438965	43	9	7.50837	7.507215	2.099	22	52	42.439	43	9	7.5092
7/28/2006 8:52:39	22	52	42.439391	42.449306	43	9	7.626609	7.625607	1.562	22	52	42.4498	43	9	7.62726
7/28/2006 8:52:40	22	52	42.450569	42.460478	43	9	7.746278	7.745207	1.559	22	52	42.46119	43	9	7.74716
7/28/2006 8:52:41	22	52	42.460456	42.470375	43	9	7.866548	7.865605	1.525	22	52	42.47029	43	9	7.86769
7/28/2006 8:52:42	22	52	42.468928	42.478858	43	9	7.987046	7.986238	1.558	22	52	42.47823	43	9	7.98789
7/28/2006 8:52:43	22	52	42.476927	42.486860	43	9	8.105138	8.104359	1.535	22	52	42.48636	43	9	8.10613
7/28/2006 8:52:44	22	52	42.482852	42.492797	43	9	8.223383	8.222807	1.535	22	52	42.49224	43	9	8.2255
7/28/2006 8:52:45	22	52	42.485845	42.495800	43	9	8.344104	8.343818	1.57	22	52	42.49379	43	9	8.34596
7/28/2006 8:52:46	22	52	42.481588	42.491539	43	9	8.461711	8.462128	1.478	22	52	42.49179	43	9	8.46384
7/28/2006 8:52:47	22	52	42.478647	42.488602	43	9	8.579354	8.579642	1.584	22	52	42.48802	43	9	8.58082
7/28/2006 8:52:48	22	52	42.472742	42.482686	43	9	8.695549	8.696133	1.621	22	52	42.48136	43	9	8.6976
7/28/2006 8:52:49	22	52	42.466252	42.476193	43	9	8.812344	8.812983	1.5	22	52	42.47565	43	9	8.8147
7/28/2006 8:52:50	22	52	42.461515	42.471464	43	9	8.929744	8.930208	1.43	22	52	42.47182	43	9	8.93248
7/28/2006 8:52:51	22	52	42.457318	42.467269	43	9	9.0452	9.045618	1.478	22	52	42.46695	43	9	9.04839
7/28/2006 8:52:52	22	52	42.448059	42.457982	43	9	9.162148	9.163057	1.61	22	52	42.45703	43	9	9.16451

FIGURA 80 - TRECHO DA PLANILHA Excel PARA ANÁLISE DO SISTEMA RTK TRIMBLE

NOTA: As altitudes elipsoidais são dadas em metros.

Os dados foram organizados em planilhas Excel para aplicação das correções de excentricidade entre as antenas, cálculo das diferenças em latitude, longitude e altitude, geração de gráficos, análise da precisão da altitude e acurácia dos sistemas RTK empregados. Todas as diferenças (latitude, longitude e altitude) são dadas em metros a partir do comprimento dos arcos de um segundo em latitude e longitude (4.21) determinados a partir da latitude média da área do levantamento.

Na planilha da FIGURA 80 a coluna “SS CORR” refere-se à parcela dos segundos das coordenadas de latitude e longitude corrigidas para a posição da antena do receptor padrão, através do procedimento de redução das excentricidades apresentado na seção 4.4.1, de acordo com a expressão (4.22). Não foi aplicada nenhuma correção para as altitudes, já que não havia recursos técnicos acurados o suficiente para se determinar uma possível diferença de altura entre as antenas. Considerou-se desta forma que ambas encontravam-se na mesma altura, conforme pode ser observado na FIGURA 28. Isto não compromete o objetivo da pesquisa, cujo interesse principal está sobre a análise da precisão das altitudes elipsoidais obtidas com as diferentes técnicas de posicionamento. Esta precisão deverá permitir descrever o comportamento da maré através da tendência da variação das altitudes elipsoidais.

A marcha de cálculo das correções de excentricidade pode ser observada no trecho da planilha da FIGURA 81.

DATA HORA	Lat(t+1) - Lat(t) (metros)	Long(t+1)-Long(t) (metros)	ALFA (rad)	ALFA (GRAUS)	DELTA LONG (metros)	DELTA LAT (metros)	CORR LAT (arc seg)	CORR LONG (arc seg)
7/28/2006 8:52:37								
7/28/2006 8:52:38	0.373261487	3.443409685	0.107977198	6.186637746	0.032976855	0.304217894	0.00990061	0.001154583
7/28/2006 8:52:39	0.317307292	3.377106561	0.093683292	5.367657239	0.028625173	0.304658168	0.00991494	0.001002222
7/28/2006 8:52:40	0.343468414	3.417961214	0.100153051	5.738347115	0.030595625	0.304466595	0.00990871	0.001071212
7/28/2006 8:52:41	0.303775043	3.435115369	0.088202822	5.053649461	0.026955081	0.304810472	0.0099199	0.000943749
7/28/2006 8:52:42	0.260320665	3.441627436	0.075495072	4.325548988	0.023079554	0.30512839	0.00993024	0.00080806
7/28/2006 8:52:43	0.245811291	3.372890853	0.072749903	4.1682624	0.022241839	0.305190597	0.00993227	0.00077873
7/28/2006 8:52:44	0.182058539	3.377295069	0.053854488	3.085634858	0.016471508	0.30555636	0.00994417	0.000576699
7/28/2006 8:52:45	0.091960303	3.447985269	0.026664414	1.527758402	0.008158344	0.305891225	0.00995507	0.000285639
7/28/2006 8:52:46	-0.13082404	3.359044144	-0.038927131	-2.230360337	-0.011908694	0.305768185	0.00995107	-0.000416946
7/28/2006 8:52:47	-0.090356344	3.360106639	-0.026884437	-1.54036476	-0.008225647	0.305889422	0.00995501	-0.000287996
7/28/2006 8:52:48	-0.18145014	3.318703602	-0.054620623	-3.129531156	-0.016705601	0.305543651	0.00994376	-0.000584895
7/28/2006 8:52:49	-0.199407105	3.335874894	-0.059705507	-3.420873593	-0.018259033	0.305454756	0.00994087	-0.000639284
7/28/2006 8:52:50	-0.145573086	3.353131873	-0.043386821	-2.48588171	-0.013272202	0.305712035	0.00994924	-0.000464685
7/28/2006 8:52:51	-0.128943536	3.297625069	-0.039082029	-2.239235334	-0.011956057	0.305766337	0.00995101	-0.000418605
7/28/2006 8:52:52	-0.284509101	3.340227697	-0.084971464	-4.868506286	-0.025969991	0.304895982	0.00992268	-0.000909259

FIGURA 81 - TRECHO DA PLANILHA EXCEL PARA CÁLCULO DAS CORREÇÕES DE EXCENTRICIDADE EMPREGADAS NA ANÁLISE DO SISTEMA RTK TRIMBLE

O ângulo α é determinado pela expressão (4.24) a partir das diferenças em latitude ($\Delta\varphi$) e longitude ($\Delta\lambda$) entre duas coordenadas tomadas em instantes sucessivos. Como pode ser visto na planilha, este intervalo de tempo foi normalmente de um segundo. Contudo, considerou-se intervalos de até 5 segundos entre pontos sucessivos para o cálculo de α , já que valores superiores não permitiriam supor um deslocamento da embarcação ortogonal à linha de base entre as antenas padrão e observada, premissa principal da metodologia apresenta na seção 3.5.1.

Pode-se ter uma idéia da velocidade média da embarcação, de aproximadamente 3 m/s, a partir das diferenças em longitude, já que no período da manhã foram realizadas linhas de sondagem no sentido Leste-Oeste (rumos 270° e 090°). Neste período, como as antenas encontravam-se transversalmente dispostas em relação ao eixo longitudinal da embarcação (ver FIGURA 27), evidenciam-se maiores as correções em latitude ($d\varphi$ - coluna “DELTA LAT” da planilha), proporcionais ao afastamento entre as antenas (*offset*) e ao ângulo α , conforme a expressão (4.23). Já as correções em longitude ($d\lambda$ - coluna “DELTA LONG” da planilha) tendem a ser menores, uma vez que as antenas estariam sempre em meridianos iguais durante o deslocamento da embarcação. As correções das colunas “DELTA LAT” e “DELTA LONG” eram convertidas em arcos de segundo, dividindo-se pelos seus respectivos valores em metros (4.21), para obtenção das coordenadas corrigidas através da expressão (4.22), apresentadas na coluna “SS CORR” (FIGURA 80).

Os gráficos da FIGURA 82 apresentam os efeitos sistemáticos nas diferenças de latitude entre os valores padrão e observados, assim como o resultado das correções de excentricidade aplicadas.

No gráfico superior da FIGURA 82 evidencia-se o efeito sistemático produzido pelo afastamento entre as antenas observada (FlexPak) e padrão (Leica GX1230), durante a realização das linhas de sondagem no período da manhã, entre 08h45 e 12h46. Já no período da tarde, quando a embarcação percorreu linhas de sondagem com orientação Norte-Sul, os erros em latitude tendem a ser menores, já que as antenas percorreriam as linhas em paralelos iguais. Portanto, no período da tarde, apesar dos erros em latitude serem menores, apresentam um aspecto aleatório, dificultando a caracterização da sua parte sistemática.

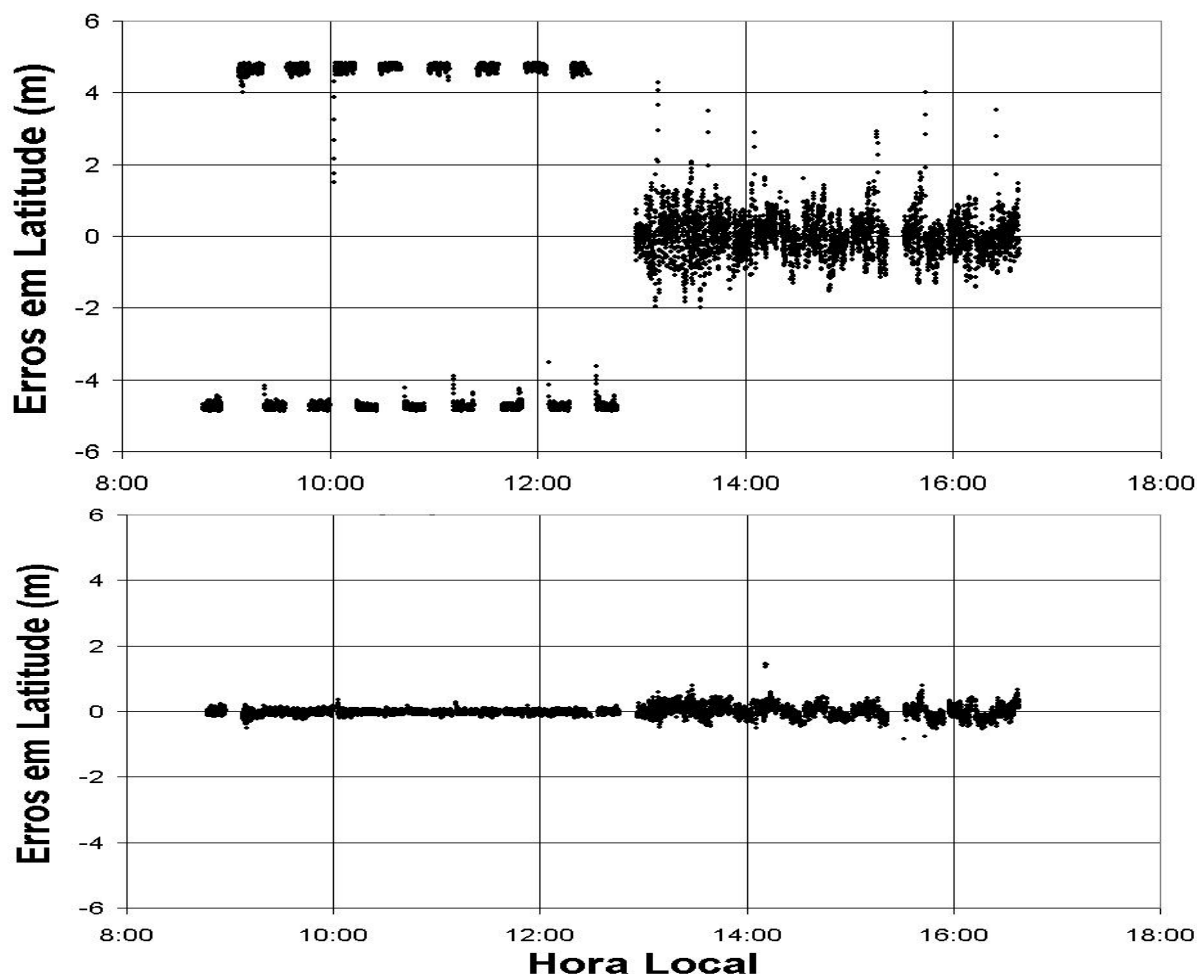


FIGURA 82 - CORREÇÃO DOS EFEITOS SISTEMÁTICOS NAS DIFERENÇAS EM LATITUDE PARA O SISTEMA FLEXPak, DECORRENTES DO AFASTAMENTO AJUSTADO DE 4,76 m ENTRE AS ANTENAS - 28/07/06

No gráfico inferior da FIGURA 82 foram aplicadas as correções de excentricidade entre as antenas FlexPak e Leica GX1230, de acordo com o *offset* de 4,81 m (FIGURA 27), medido por trenas milimétricas a bordo. Verificou-se que este processo pode representar também uma forma de calibração destes *offsets*, normalmente tomados com a embarcação em sua condição normal de operação, inviabilizando a realização destas medidas por métodos topo-geodésicos rigorosos. Neste exemplo do *offset* FlexPak - Leica GX1230, através de um simples ajustamento para minimização dos efeitos sistemáticos dos erros em latitude, chegou-se ao valor de 4,76 m. Contudo recomenda-se a realização de uma investigação científica mais rigorosa para sua validação.

Os gráficos da FIGURA 83 apresentam o comportamento das soluções RTK do sistema Trimble durante o levantamento hidrográfico do dia 28 de julho.

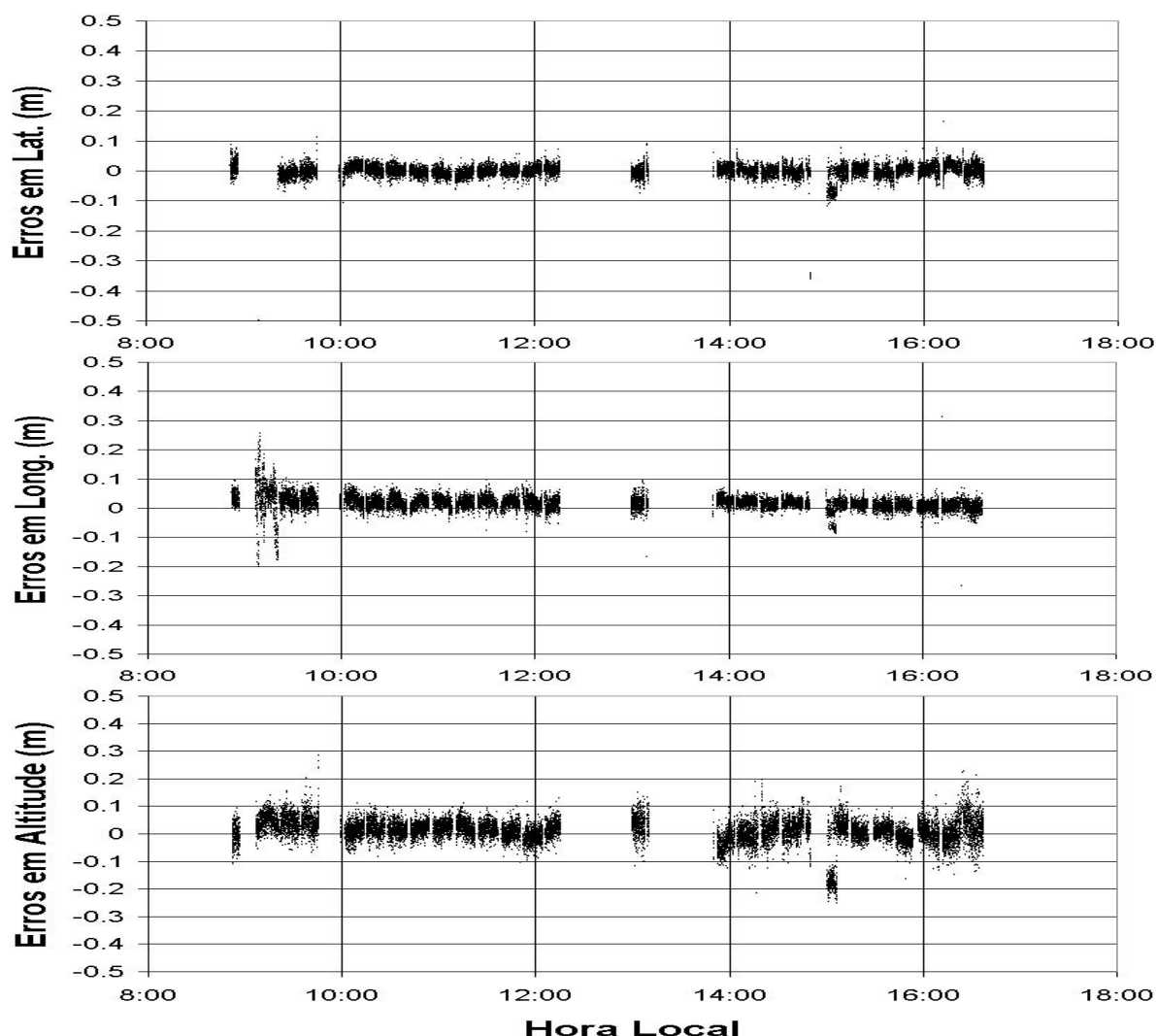


FIGURA 83 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - OFFSET AJUSTADO 0,288 m

Apesar da distância medida entre as antenas ter sido de 30,2 cm, esta foi ajustada, através do processo para minimização dos erros sistemáticos, para 28,8 cm. Em função desta curta distância os erros aleatórios, em latitude para o período da tarde e em longitude no período da manhã, não foram muito expressivos e puderam também ser suavizados pelo processo de correção das excentricidades.

Os gráficos representam uma boa qualidade nas posições RTK Trimble, cujos erros mantiveram-se dentro de uma faixa de 10 cm, exceto pela componente de latitude que apresentou variações de aproximadamente 12 cm. O resultado da

análise do sistema RTK Trimble é sumarizado pela Tabela 30, cuja acurácia 2dRMS do sistema foi de 25,68 cm, o que suplanta largamente a acurácia recomendada pela IHO para levantamentos de Ordem Especial (Tabela 27).

TABELA 30 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTK TRIMBLE DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

Componente	Erros em cm					
	Máximo	Médio	Int. Conf. (95%)	1.σ	RMS	RMS 95%
Latitude	16,36	-2,74	± 0,18	12,18	12,48	24,47
Longitude	31,30	1,74	± 0,04	2,50	3,04	5,96
Altitude	52,2	1,17	± 0,11	7,85	7,94	15,56
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						25,68 cm

A precisão das altitudes elipsoidais também foi analisada, a fim de verificar a capacidade do sistema em acompanhar a variação do nível do mar instantâneo. O gráfico da FIGURA 84 apresenta o grau de repetibilidade das altitudes elipsoidais em instantes sucessivos de um segundo.

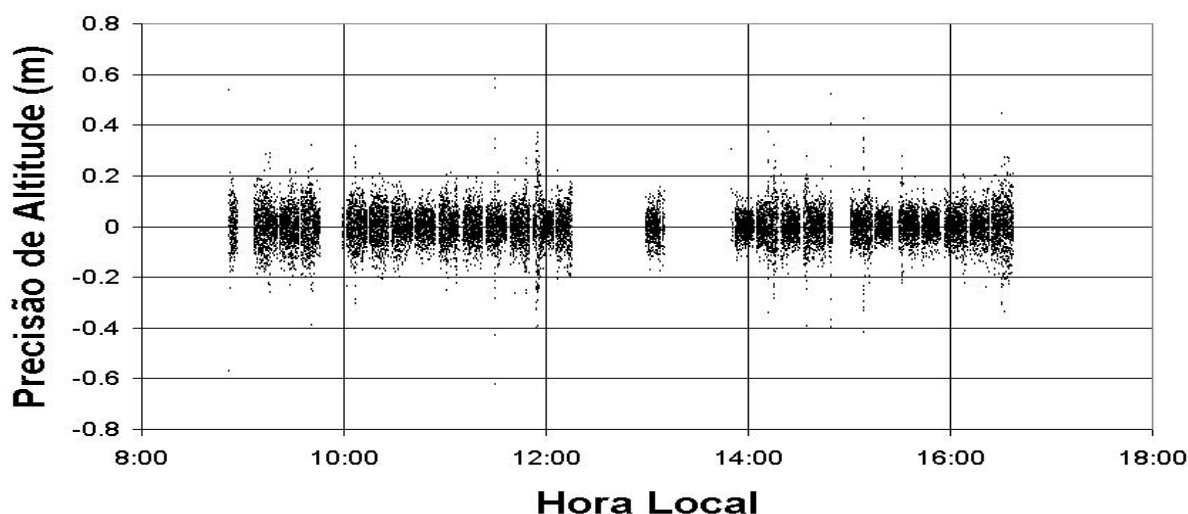


FIGURA 84 - VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIS TRIMBLE EM INTERVALOS DE 1 SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

Durante o levantamento as oscilações verticais de atitude da embarcação (efeito *heave*) variaram dentro de uma faixa de 10 cm (seção 3.2.5), podendo ser consideradas desprezíveis no intervalo de um segundo. A precisão da altitude do sistema RTK Trimble ficou em 12,87 cm, ao nível de confiança de 95%, mostrando-se perfeitamente adequada para o acompanhamento do nível do mar, conforme ficou demonstrado nos resultados das profundidades reduzidas obtidas a partir das correções de marés geradas pelo sistema, apresentados na Tabela 26.

A FIGURA 85 apresenta o comportamento dos erros em latitude e longitude do sistema RTK FlexPak durante o levantamento hidrográfico do dia 28 de julho, tomando-se como padrão as coordenadas obtidas do resultado do posicionamento relativo cinemático a partir das observações brutas de dupla frequência coletadas pelo receptor Leica GSX1230. Nesta análise foi apenas considerada a precisão da altitude, uma vez que não havia uma forma acurada de se obter as diferenças verticais entre as antenas analisadas.

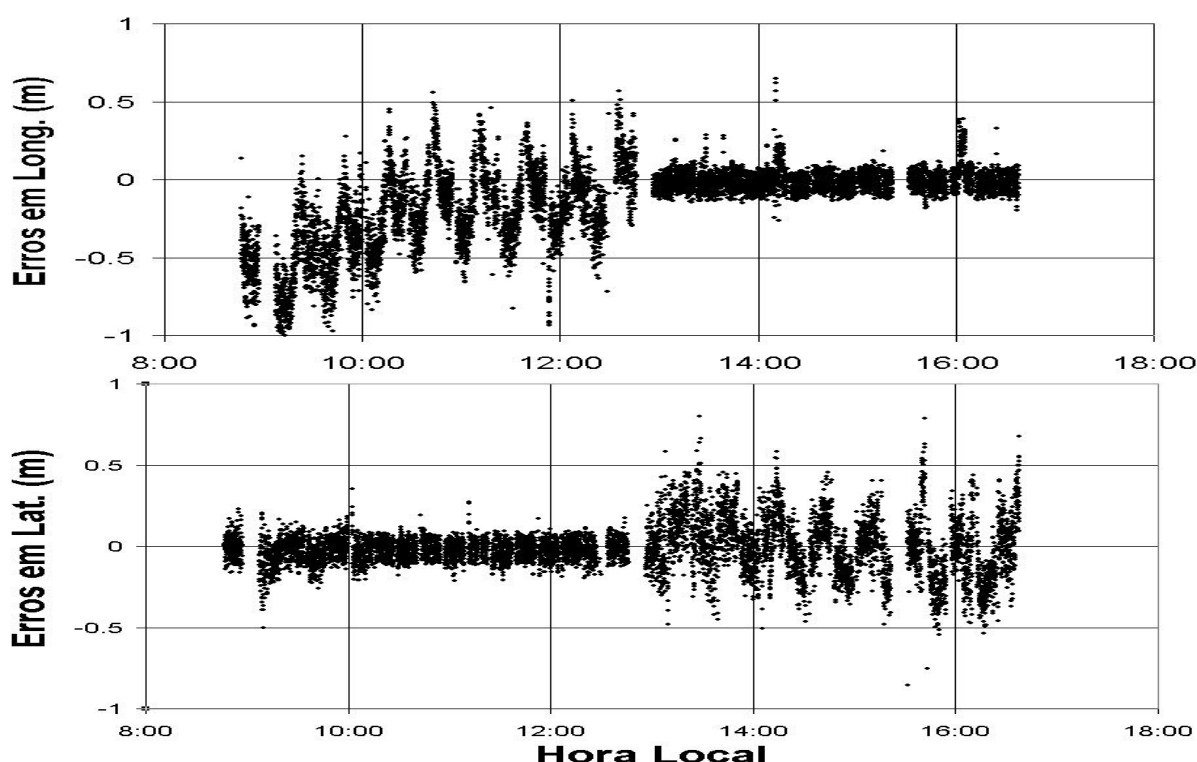


FIGURA 85 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK FLEXPAK DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - OFFSET AJUSTADO 4,76 m

A instalação da antena do sistema FlexPak a bordo da embarcação de sondagem não foi no local mais apropriado, que seria na verga do mastro onde foram instaladas as antenas dos receptores Ashtech, Trimble e RTG C-Nav. Pensava-se em realizar um estudo de atitude a partir de equipamentos GPS RTK. Desta forma, o FlexPak foi selecionado para ser instalado em um dos bordos na proa. Porém este estudo não foi realizado, uma vez que foi impossível determinar, de forma precisa, as linhas de base entre as antenas GPS, sem que a embarcação fosse docada. Desta forma a linha de base, obtida por medida direta com trena milimétrica, entre a antena FlexPak e a antena do receptor Leica GX1230 foi de

aproximadamente 4,81 metros, ajustado para 4,76 m. Em função deste valor, mesmo após a correção de excentricidade, os erros em latitude no período da tarde e em longitude no período da manhã tiveram um comportamento aleatório mais intenso que o sistema RTK Trimble, conforme pode ser observado nos gráficos da FIGURA 85. Sendo assim, a fim de permitir maior confiabilidade na análise dos dados, foram consideradas apenas as posições observadas durante o período da manhã (08h56 - 12h46), para o cálculo dos erros em latitude, e para os erros em longitude, apenas as observações do período da tarde (12h56 - 16h38), redundando nos gráficos da FIGURA 86.

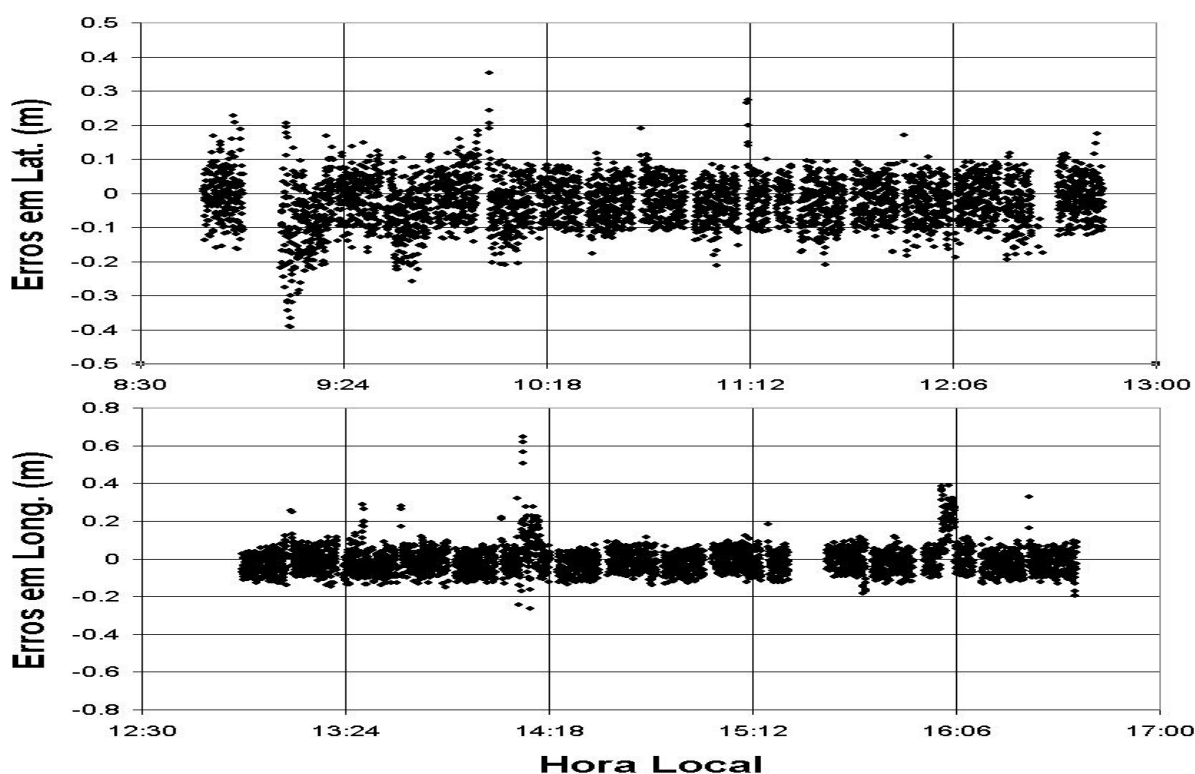


FIGURA 86 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTK FLEXPAK DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 (LATITUDE - MANHÃ) / (LONGITUDE - TARDE)

A análise da performance do sistema RTK FlexPak é resumida pela Tabela 31. Mesmo com sua antena instalada em um local não muito apropriado, na proa da embarcação, o que aumentam as possibilidades de perdas de sinal e multicaminho, as componentes latitude e longitude tiveram comportamentos semelhantes, apresentando erros abaixo dos 10 cm. Da mesma forma que o sistema RTK Trimble, sua acurácia horizontal, estimada em 20,31 cm dRMS, suplanta largamente os padrões exigidos para levantamentos de Ordem Especial.

TABELA 31 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTK FLEXPAC DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

Componente	Erros em cm					
	Máximo	Médio	Int. Conf. (95%)	1.σ	RMS	RMS 95%
Latitude	35,17	-2,70	± 0,22	7,00	7,51	14,72
Longitude	64,73	-0,90	± 0,23	7,31	7,36	14,43
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						21,03 cm

A precisão da altitude (FIGURA 87), obtida a partir das diferenças entre observações sucessivas em um intervalo de um segundo, foi de 13,74 cm, o que permitiu ao sistema RTK FlexPak fornecer uma informação de maré baseada na tendência da variação de suas altitudes elipsoidais, com uma acurácia de 3,3 cm, conforme a Tabela 23 da seção 4.2.4.

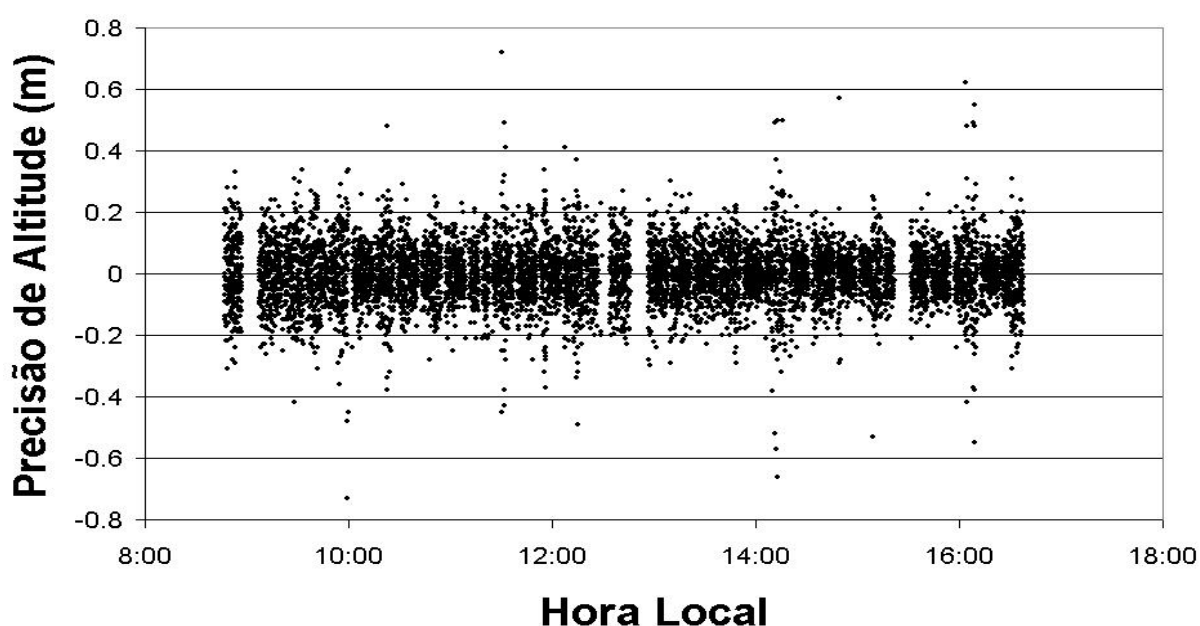


FIGURA 87 - VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIS FLEXPAC EM INTERVALOS DE 1 SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

4.4.3 Análise de acurácia do sistema RTG C-Nav

Para esta análise procedeu-se a um teste estático, instalando-se a antena do receptor C-Nav 2050M sobre o marco PILA (F-21-1515-004/00) dotado de pino de centragem forçada, cujas coordenadas WGS-84 G1150 calculadas são dadas na Tabela 15. Foram realizadas três seções com durações de 10 a 20 minutos cada, onde foram analisados os erros em latitude, longitude e altitude. Para a realização

de cada seção o receptor foi reinicializado, conforme apresentado nos gráficos da FIGURA 88.

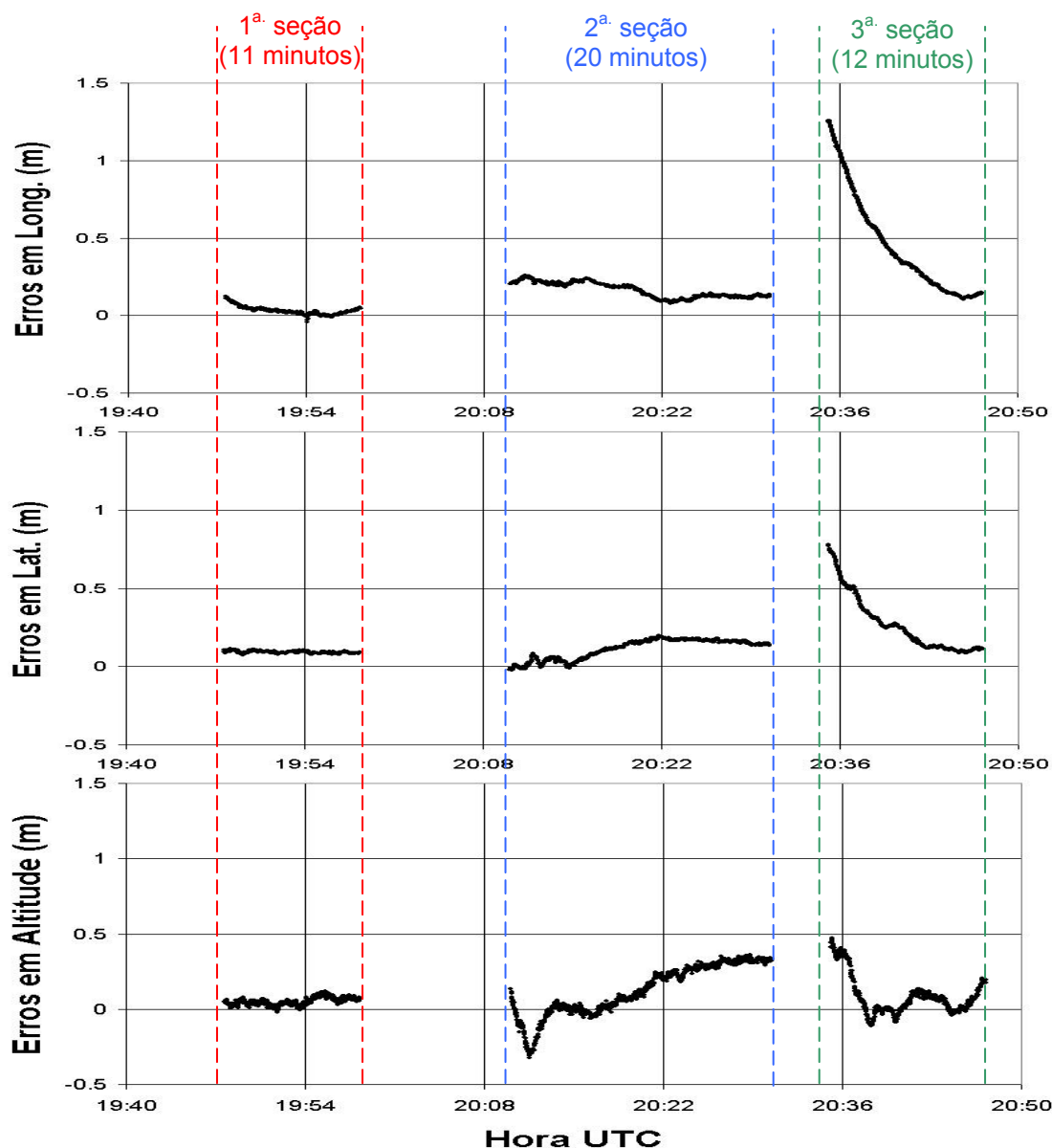


FIGURA 88 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTG C-NAV DURANTE O TESTE ESTÁTICO SOBRE O MARCÓ PILA - DIA 19/07/06.

Em todas as seções as soluções de posição possuem índice de qualidade 2, ou seja, obtidas a partir da correção RTG de dupla frequência fornecida pelo satélite geoestacionário. Excetuando-se a primeira seção, quando os dados foram coletados após um período maior de inicialização do receptor, as duas outras seções apresentam uma relativa instabilidade dos erros em latitude, longitude e altitude. Segundo BISNATH et. al. (2003), o sistema RTG C-Nav apresenta um período de

convergência de aproximadamente 30 minutos, ou seja, o tempo necessário para se obter soluções de posição confiáveis a partir do instante em que se liga o receptor. Em nenhuma das seções realizadas foi possível observar este tempo mínimo de convergência. Com isso, estes testes possibilitam apenas uma estimativa da acurácia relativa dentro do período em que foram efetuadas as observações, conforme pode ser observado pelas diferenças significativas entre os resultados, sumarizados na Tabela 32.

TABELA 32 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DO TESTE ESTÁTICO DO SISTEMA RTG C-NAV

Inicialização	Período	Componente	Erros em cm					
			Máx.	Médio	Int. Conf. (95%)	1.σ	RMS	RMS 95%
19h30	19h47 - 19h58	Latitude	11,39	9,18	± 0,06	0,78	9,22	18,07
		Longitude	12,31	3,08	± 0,20	2,62	4,04	7,92
		Altitude	11,88	4,92	± 0,20	2,53	5,54	10,85
19h59	20h10 - 20h30	Latitude	19,87	11,33	± 0,35	6,32	12,97	25,42
		Longitude	26,02	16,28	± 0,28	4,92	17,01	33,34
		Altitude	36,38	12,36	± 0,94	16,69	20,77	40,70
20h33	20h35 - 20h47	Latitude	77,76	26,55	± 1,30	17,91	32,02	62,78
		Longitude	126,9	44,22	± 2,32	31,95	54,56	106,9
		Altitude	47,08	8,49	± 0,93	12,77	15,33	30,06

Em todos os resultados, apesar da não observação do tempo mínimo de estabilização das soluções de posição, pode-se perceber que a componente em longitude apresentou, na maioria das vezes, os maiores erros. Segundo BISNATH et. al. (2003), a componente de longitude requer um tempo de convergência maior, aproximadamente duas horas. Desconsiderando os resultados da terceira seção por terem sido coletados muito próximo do instante em que foi ligado o receptor, a acurácia horizontal estimada foi de 10 a 20 cm, e uma acurácia vertical de 10 a 40 cm, ao nível de confiança de 95%.

O gráfico superior da FIGURA 89 refere-se aos parâmetros de HDOP, PDOP, VDOP e número de satélites observados, durante o levantamento hidrográfico do dia 28 de julho, com o emprego do RTG C-Nav. O gráfico inferior da FIGURA 89 apresenta as idades das correções RTG de dupla frequência. O número de satélites observados manteve-se entre 5 e 10, exceto por uma perda de sinal às 9h46, quando se chegou a três satélites por apenas dois segundos. A partir das 16h21 houve um atraso excessivo no recebimento das correções RTG, chegando a

93 segundos. Após dois minutos o receptor voltou a operar normalmente com uma idade média das correções de 9 segundos, mantendo uma boa disponibilidade de soluções de índice 2.

Através da mensagem NMEA \$GPGST foi possível observar a variação dos parâmetros de precisão do sistema HDOP, PDOP e VDOP. Este último de maior importância para a análise de acurácia da altitude. Todos se mantiveram abaixo de 4, exceto durante o período de maior latência nas correções RTG. Isto representa um bom indicativo de qualidade das soluções de posição.

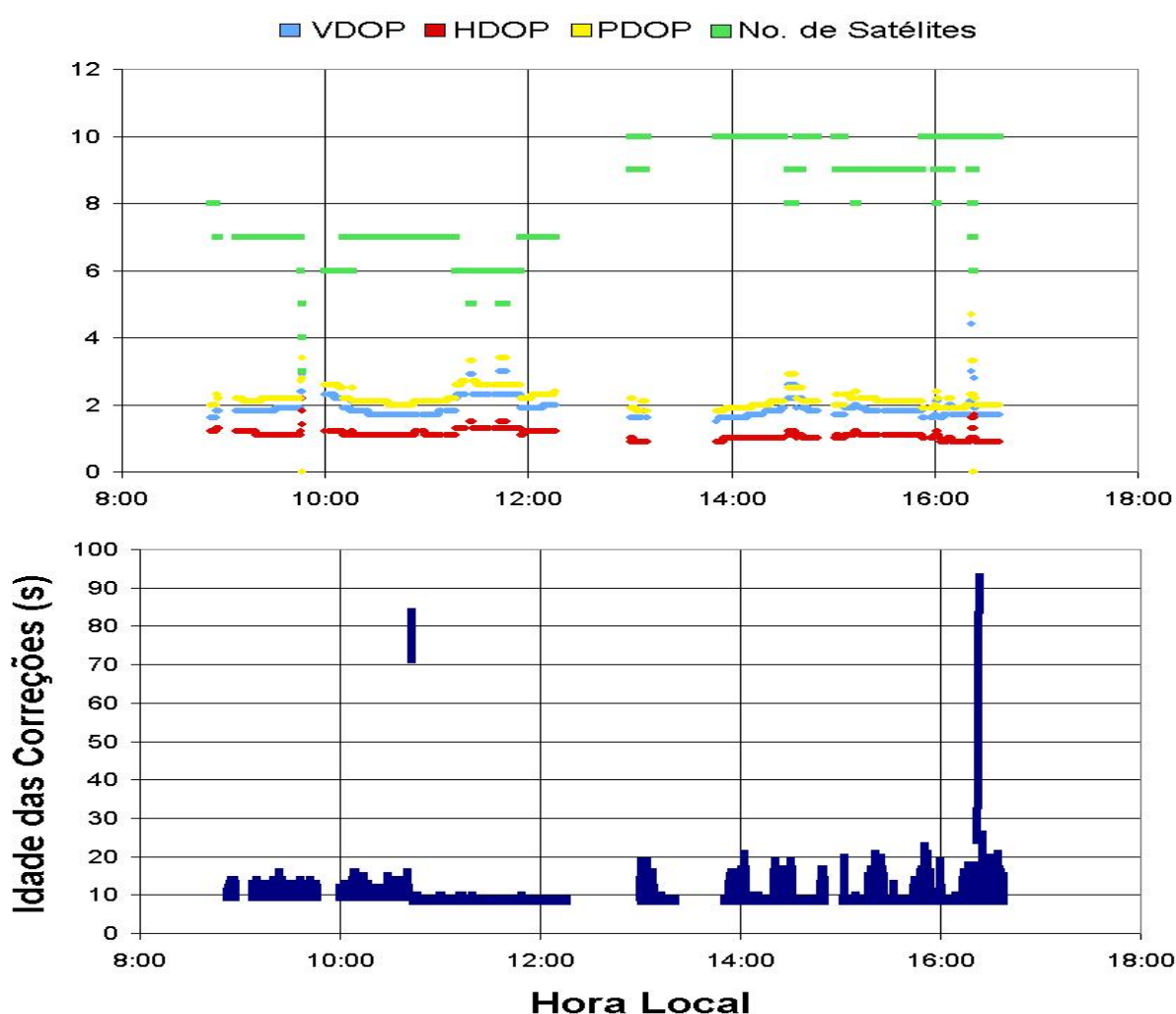


FIGURA 89 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO SISTEMA RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06.

O gráfico superior da FIGURA 90 apresenta o comportamento dos erros das componentes em latitude e longitude das soluções de posição RTG C-Nav. O gráfico inferior descreve os erros em altitude e apresenta as correções de marés tomadas a partir da estação maregráfica da Ilha Fiscal. Estes erros foram obtidos de acordo

com a metodologia apresentada para a análise dos sistemas RTK (seção 4.4.2), através de comparações com as coordenadas padrão determinadas com base nas observações GPS brutas do receptor Ashtech Z-XII, diferindo apenas no valor das correções de excentricidades aplicadas. Como a antena RTG C-Nav encontrava-se a bombordo (esquerda) da antena Ashtech, a expressão (4.22) é reescrita como:

$$\begin{aligned}\lambda_c^{i+1} &= \lambda_0^{i+1} + d\lambda \\ \varphi_c^{i+1} &= \varphi_0^{i+1} - d\varphi\end{aligned}\quad (4.27)$$

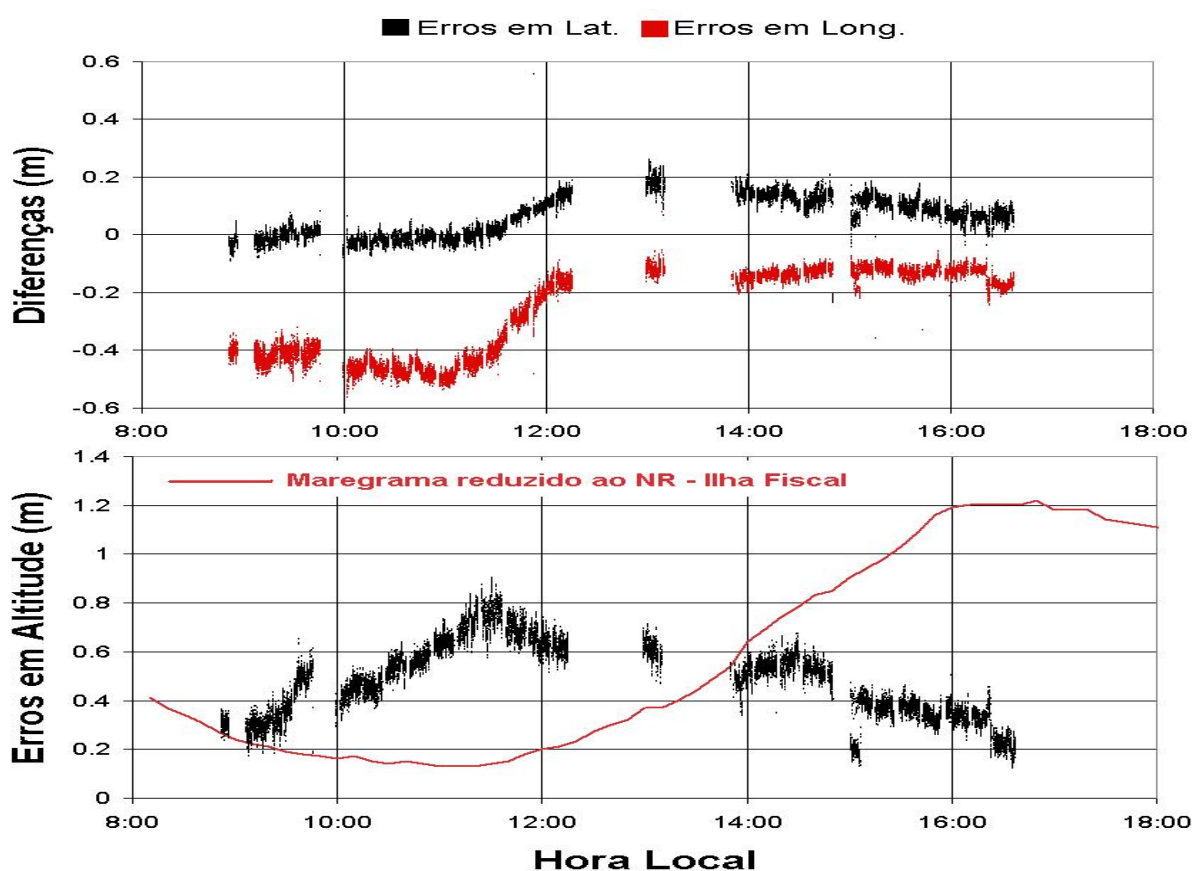


FIGURA 90 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06 - OFFSET AJUSTADO 0,326 m

Em ambos os gráficos nota-se uma descontinuidade de dados entre às 09h46 e 09h59. Isto ocorre devido à ausência de coordenadas padrão neste período. Entretanto, conforme observado no gráfico superior da FIGURA 89, houve uma perda de sinal exatamente às 09h46, provocando uma nova inicialização do sistema, o que gerou um degrau entre as soluções fornecidas entre as duas épocas distintas

(antes e depois da perda de sinal). Isto fica mais nítido no gráfico dos erros em altitude (gráfico inferior da FIGURA 90). Um período maior de latência das correções RTG (FIGURA 89) também provoca este tipo de erro (degrau), conforme pode ser observado às 15h02 e 16h21 na FIGURA 90.

Uma outra característica do sistema RTG C-Nav empregado nesta pesquisa, foi a ausência de correções das marés terrestres, cujo efeito torna-se nítido ao se verificar os erros em altitude. Como as observações das oscilações do nível do mar, tomadas a partir do marégrafo da Ilha Fiscal, sofrem os mesmos efeitos de marés terrestres que a estação de referência do receptor Ashtech, percebe-se uma oscilação nos erros em altitude inversamente proporcional à variação do nível do mar. Próximo ao instante da baixamar na Ilha Fiscal, os erros em altitude assumem uma nova tendência, e passam a diminuir durante o período de cheia da maré. Esta pode ser a principal fonte de erro no emprego do sistema RTG C-Nav, sem correções de marés terrestres, para reduções batimétricas em áreas costeiras, ou águas interiores (baías, lagos etc), apesar da boa precisão de suas altitudes elipsoidais, como pode ser visto no gráfico da FIGURA 91.

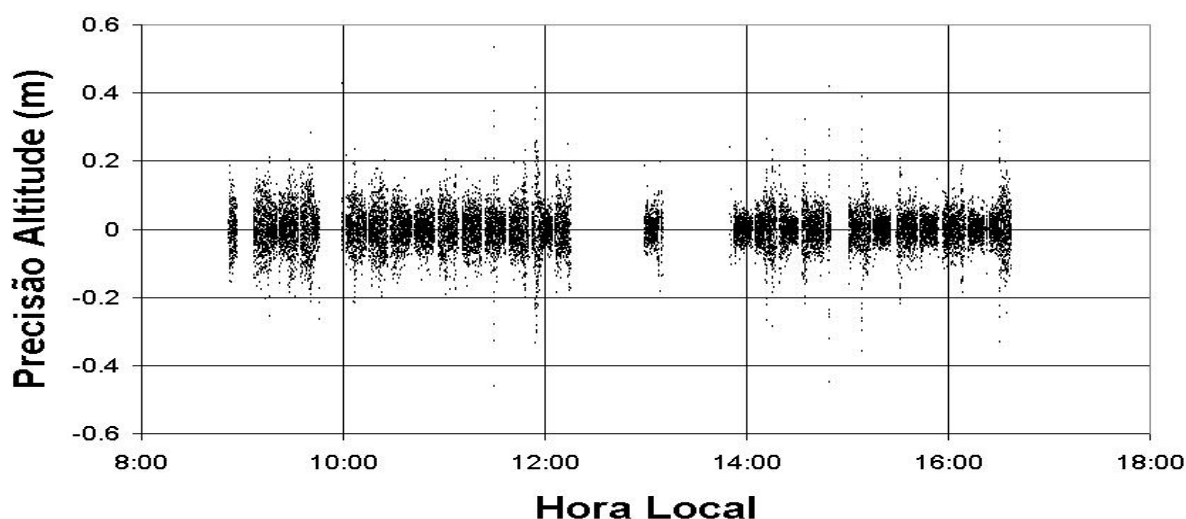


FIGURA 91 - VARIAÇÃO DAS ALTITUDES ELIPSOIDAIAS RTG C-NAV EM INTERVALOS DE 1 SEGUNDO DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

A precisão das altitudes elipsoidais, calculada de acordo com REMONDI et al. (2000) (seção 4.4), do sistema RTG C-Nav foi de 10,56 cm, ao nível de significância de 95%. Apesar desta alta precisão, a não consideração dos efeitos das marés terrestres provocaram, além de diferenças em amplitude, uma diferença de fase entre as ondas de marés obtidas pela variação das altitudes elipsoidais e aquela

observada pelo marégrafo, conforme é apresentado na FIGURA 69. Isto redundou em um alto erro sistemático (48 cm) e uma acurácia de 98 cm (95%) (Tabela 32), insuficiente para levantamentos de Ordem Especial, em áreas costeiras e águas interiores.

Os resultados da análise de acurácia do sistema RTG C-Nav é sumarizado na Tabela 33, que também atende aos requisitos horizontais recomendados pela IHO para levantamentos de Ordem Especial (Tabela 27).

TABELA 33 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO SISTEMA RTG C-NAV DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 28/07/06

Componente	Erros em cm					
	Máximo	Médio	Int. Conf. (95%)	1.σ	RMS	RMS 95%
Latitude	26,04	5,85	± 0,09	6,66	8,86	17,37
Longitude	8,03	-26,00	± 0,22	15,01	30,89	60,55
Altitude	90,3	48,00	± 0,22	15,11	50,32	98,64
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						64,27cm

4.4.4 Análise de acurácia dos sistemas DGPS

Foi analisada apenas a acurácia horizontal dos sistemas DGPS Ashtech Z-XII e Trimble NT200D, em face do seu largo emprego em levantamentos hidrográficos (seção 2.4.2). As estações de referência foram o ponto GUAR (Tabela 15), para o receptor Ashtech Z-XII, e o radiofarol da Ilha Rasa (Tabela 12), receptor Trimble NT200D. A acurácia vertical não foi analisada porque a precisão altimétrica destes sistemas não permite acompanhar as oscilações do nível do mar, além das *strings* NMEA de ambos os receptores fornecerem apenas o valor inteiro da altitude elipsoidal.

Os dados observados dos receptores Trimble NT200D e Ashtech foram obtidos das mensagens NMEA \$GPGGA, disponibilizadas com uma frequência de 1 Hz ao mesmo computador (ver FIGURA 35) durante o levantamento hidrográfico do dia 26 de julho. Já as observações brutas GPS de dupla frequência foram gravadas diretamente na memória do receptor Ashtech Z-XII com uma taxa de três segundos, o que limitou a análise a um período de aproximadamente duas horas e meia. Foram analisadas 1487 amostras do receptor Ashtech Z-XII, e 2604 amostras do receptor Trimble NT200D (Tabela 28).

O gráfico superior da FIGURA 92 apresenta os parâmetros de HDOP, número de satélites observados, tipo de solução de posição fornecida. No gráfico inferior são observadas as idades das correções diferenciais recebidas pelo receptor Trimble NT200D.

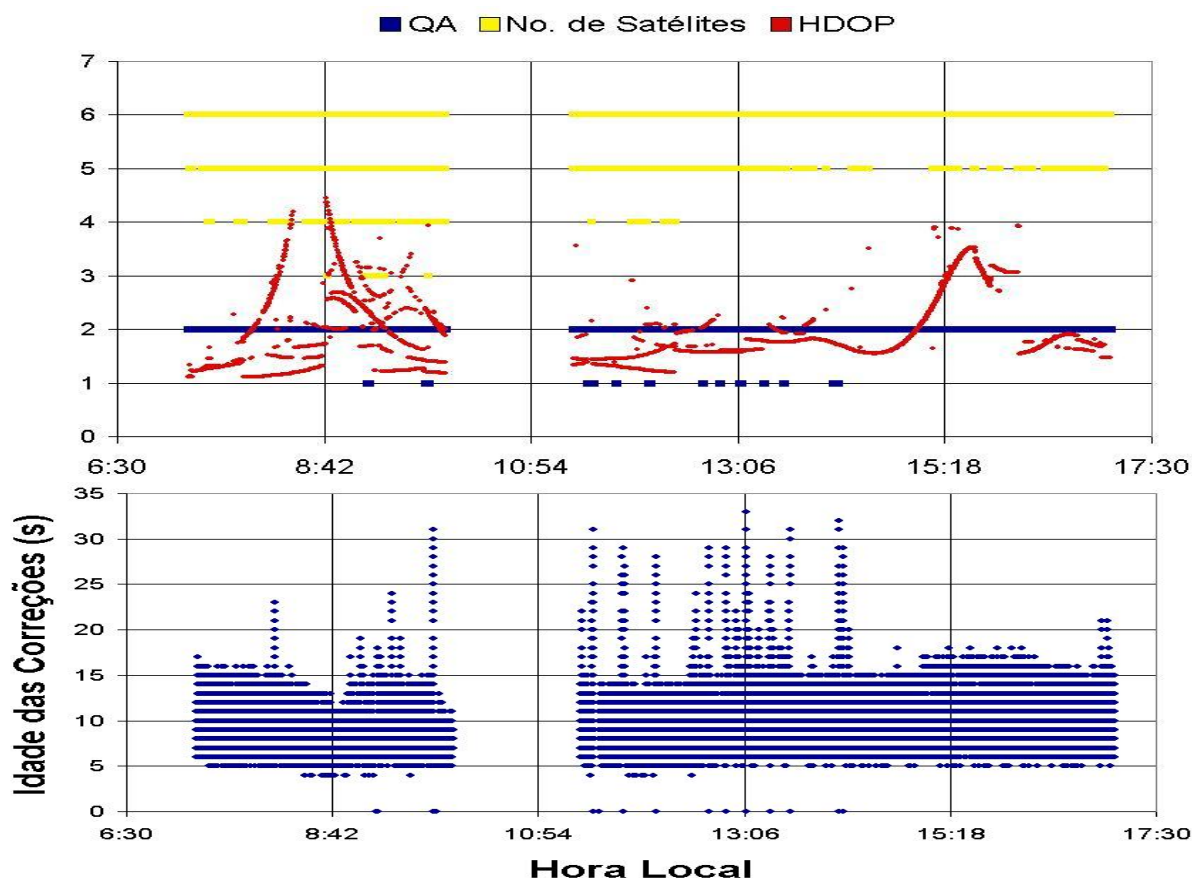


FIGURA 92 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO RECEPTOR DGPS TRIMBLE NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06

O receptor NT200D apresentou uma disponibilidade de 99,17% de posições do tipo 2, ou seja, aquelas obtidas a partir das correções diferenciais transmitidas pela estação de referência (radiofarol da Ilha Rasa), que se encontrava a uma distância aproximada de 34 km da área de pesquisa. A latência média das correções diferenciais foi de 9 segundos, entretanto o receptor fornecia posições de qualidade diferencial, com a observação de pelo menos quatro satélites com latências de até 33 segundos, o que pode ter comprometido a qualidade da solução de posição.

A FIGURA 93 apresenta no gráfico superior o comportamento dos erros em latitude e longitude durante o período da análise. No gráfico inferior observam-se os

erros em latitude, e no gráfico central os parâmetros de qualidade da solução de posição, HDOP e número de satélites observados durante o período da análise.

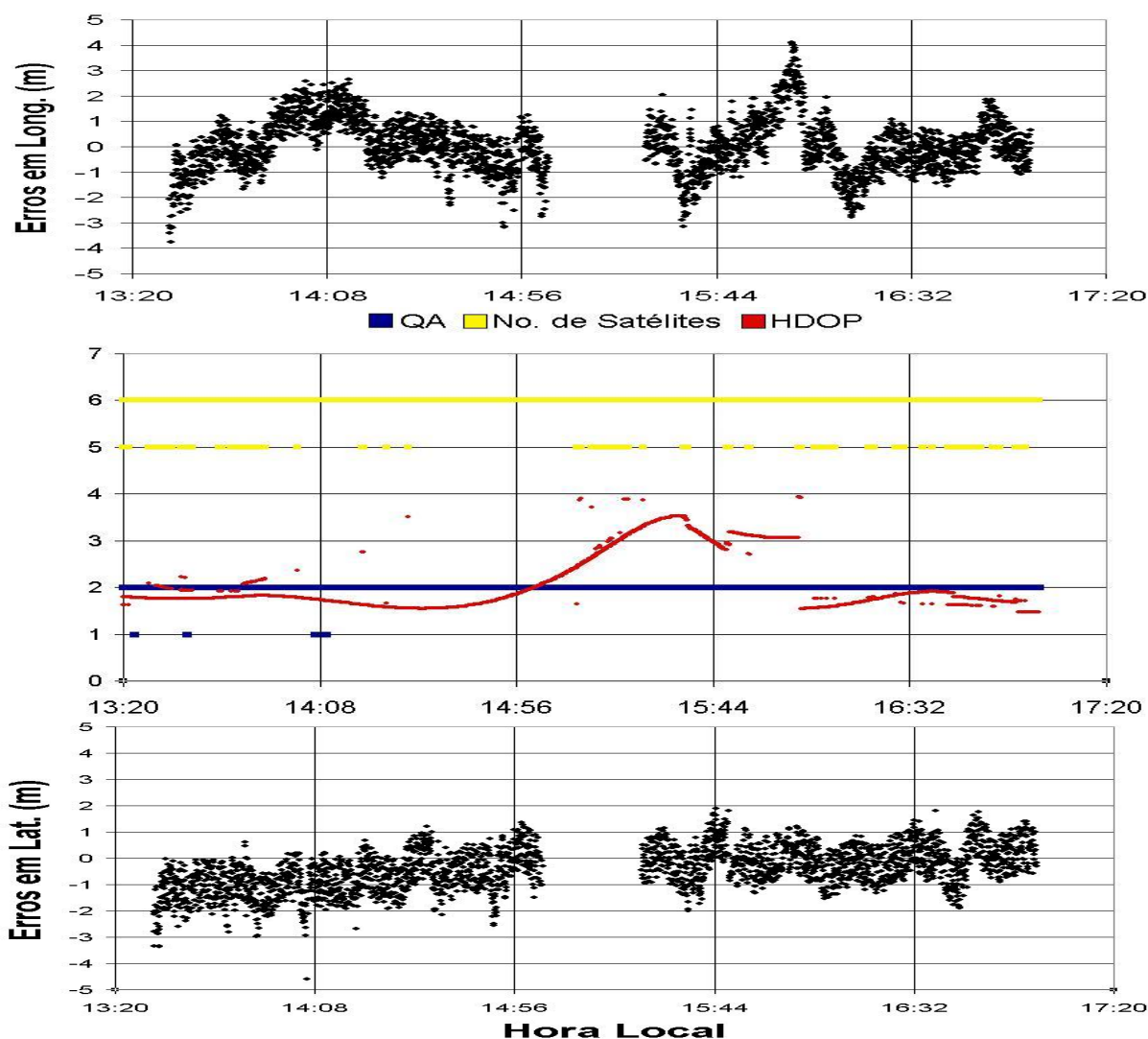


FIGURA 93 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DGPS NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06

A análise de acurácia foi realizada da mesma forma que nos sistemas RTK e RTG, a partir das coordenadas Trimble NT200D corrigidas da sua excentricidade horizontal em relação à antena Ashtech. Deve-se levar em consideração que os erros em latitude e longitude (FIGURA 93) incorporam ainda as incertezas envolvidas na medida do posicionamento relativo entre as antenas, a partir de trenas milimétricas, e do processo de correção das excentricidades descrito na seção 4.4.1. Ambas as componentes apresentaram variações dentro de uma faixa de

aproximadamente 3 metros, sendo que componente de longitude mostrou-se mais sensível às mudanças de HDOP. Os resultados estão sumarizados na Tabela 34.

TABELA 34 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO DGPS NT200D DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06

Componente	Erros em metros					
	Máximo	Médio	Int. Conf. (95%)	1.σ	RMS	RMS 95%
Latitude	1,894	-0,433	± 0,038	0,998	1,088	2,133
Longitude	4,107	0,046	± 0,22	0,040	1,055	2,068
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						3,032 m

Os parâmetros HDOP, qualidade das posições (diferencial - 2 / posicionamento absoluto - 1), número de satélites rastreados são apresentados no gráfico superior da FIGURA 94, e as idades das correções diferenciais referentes ao receptor DGPS Ashtech Z-XII podem ser visualizadas no gráfico inferior da FIGURA 94.

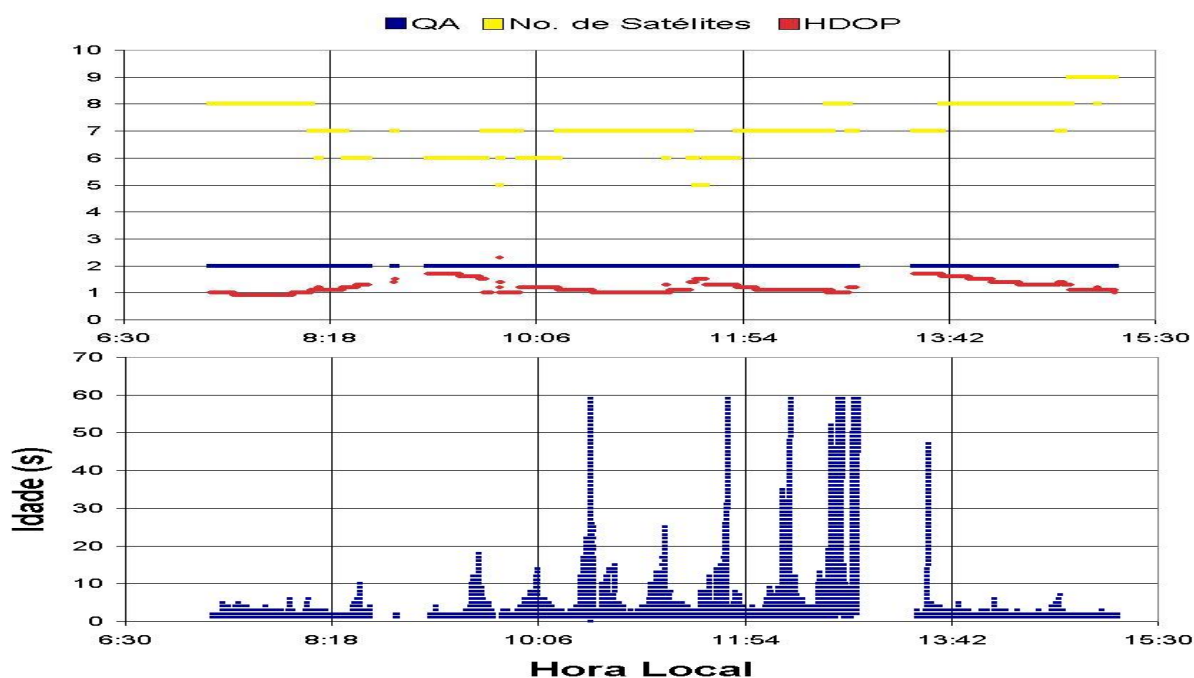


FIGURA 94 - PARÂMETROS DE QUALIDADE DOS SINAIS DO RECEPTOR DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06.

A qualidade das posições DGPS fornecidas pelo receptor Ashtech Z-XII foram analisadas de forma mais isenta, em função das coordenadas padrão terem sido obtidas a partir das observações brutas GPS coletadas pela mesma antena, evitando erros provenientes das correções de excentricidade. As posições Ashtech

foram extraídas das mensagens NMEA \$GPGGA gravadas em computador na frequência de 1 Hz.

O número de satélites rastreados ficou, na maior parte do período do levantamento observado, entre 6 e 8, com valores de HDOP variando em torno 1,2 e uma idade média das correções diferenciais de 2,7 segundos. Esses dados são indicadores de uma ótima qualidade das soluções de posições fornecidas pelo sistema. Comparando os gráficos das FIGURAS 95 e 93, o sistema DGPS Ashtech apresentou um melhor desempenho, entretanto deve-se considerar que sua estação de referência encontrava-se a apenas 3,5 km aproximadamente. Além disso, a antena Ashtech estava mais bem posicionada (na verga de bombordo do mastro), o que proporcionou uma visada mais clara para os satélites.

Os erros em latitude e longitude obtidos durante o período de análise são apresentados na FIGURA 95.

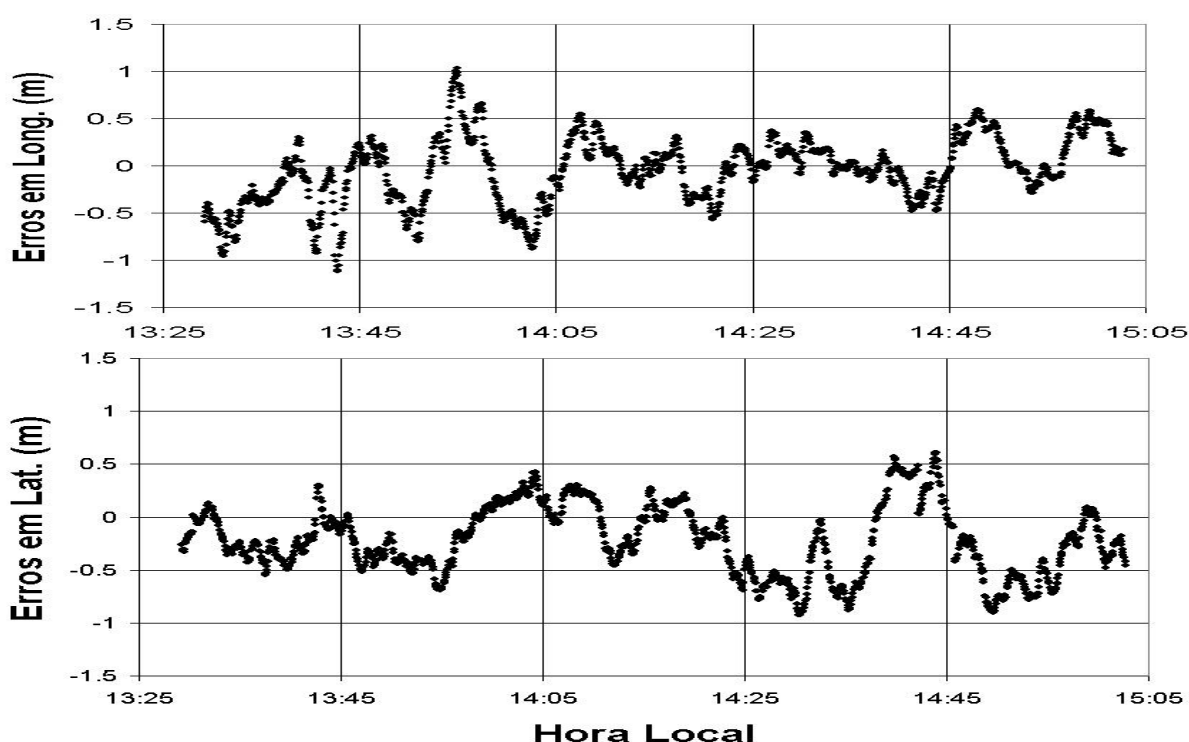


FIGURA 95 - PERFORMANCE DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26 DE JULHO

O período da análise foi de aproximadamente 1h40 em função da limitação de memória do receptor Ashtech, que gravou as observações brutas GPS para o pós-processamento. Mesmo assim, dentro deste período, a componente em longitude apresentou erros que oscilaram dentro de uma faixa de 1 metro, e já a

componente em latitude redundou em uma variação menor, dentro de aproximadamente 50 cm. O sumário estatístico desta análise encontra-se na Tabela 35.

TABELA 35 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DAS SOLUÇÕES DE POSIÇÃO DO DGPS ASHTECH Z-XII DURANTE O LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO DO DIA 26/07/06

Componente	Erros em metros					
	Máximo	Médio	Int. Conf. (95%)	1. σ	RMS	RMS 95%
Latitude	0,608	-0,220	\pm 0,017	0,330	0,397	0,777
Longitude	1,033	-0,050	\pm 0,018	0,355	0,358	0,703
Incerteza do posicionamento 2dRMS (95%)						1,069 m

Mesmo não sendo o objetivo desta pesquisa avaliar o sistema DGPS, devido a falta de precisão vertical suficiente, os resultados obtidos pela análise da acurácia horizontal estão compatíveis com as pesquisas anteriores. Em ambos os receptores as acurácias 2dRMS obtidas são menores que o valor inicial adotado por BRIONES (1999), igual a 5 metros, e compatíveis com os resultados de MONTEIRO e MARREIROS (2003). PRADO (2001) fez análise a partir de ocupações de aproximadamente 15 minutos, o que não é possível realizar em operações no mar. Conseqüentemente as acurácias obtidas por PRADO (2001) são melhores que os resultados alcançados com esta pesquisa .

O receptor Ashtech Z-XII atendeu ao requisito de acurácia horizontal recomendado para levantamentos de Ordem Especial (Tabela 27). É necessária uma avaliação mais rigorosa do receptor Trimble NT200D. Deve-se buscar uma redução dos erros de excentricidade e um melhor posicionamento de sua antena, para afirmar se este equipamento pode atender à acurácia horizontal necessária nos levantamentos hidrográficos de Ordem Especial.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

A presente pesquisa procurou apresentar a viabilidade de emprego da metodologia de reduções batimétricas através de métodos precisos de posicionamento GPS, considerando-se também o emprego de serviços comerciais WADGPS de alta precisão, como o sistema RTG C-Nav, fornecido pela empresa *C&C Technologies Inc.*. O grande diferencial desta metodologia está na substituição das observações maregráficas realizadas na costa pela variação das altitudes elipsoidais durante o próprio deslocamento da embarcação de sondagem.

Os aspectos fundamentais da metodologia envolvem o conhecimento da relação entre o NR local e o elipsóide associado ao sistema WGS-84, a determinação precisa da altura da antena GPS e profundidade de imersão do transdutor. Desta forma a utilização de uma área de trabalho onde o NR pudesse ser considerado constante foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa. O método de GOLDAN (1994), para determinação das alturas das antenas GPS, também demonstrou ser uma solução viável, quando não é possível a obtenção destes *offsets* por métodos topográficos, com a embarcação docada.

O programa computacional (SIRBAT/GPS - Sistema de Redução Batimétrica GPS), desenvolvido durante esta pesquisa, proporcionou melhor controle do processamento dos dados adquiridos, possibilitando uma análise mais rigorosa dos mesmos, e permitindo uma independência dos algoritmos comerciais, sobretudo daqueles empregados nas análises das linhas de verificação, e que muitas vezes, não são claramente descritos nos manuais. As correções de marés podem ser calculadas sem a necessidade de interpolações, de forma sincronizada com as sondagens. O SIRBAT/GPS acrescenta ao bloco de sondagens parâmetros de qualidade, possibilitando sua perfeita classificação de acordo com os requisitos recomendados pela IHO.

A análise de linhas de verificação fornece uma estimativa da qualidade das profundidades reduzidas, contudo, a classificação de um levantamento hidrográfico depende ainda da acurácia posicional destas profundidades. Portanto, como complemento da pesquisa, foi necessária uma análise da acurácia dos sistemas de posicionamento, em operações no mar. A alta precisão dos sistemas RTK e RTG,

exigia a eliminação de erros sistemáticos ocorridos em função das distâncias relativas entre as antenas analisadas e a aquela de origem das coordenadas padrão. Tais excentricidades puderam ser minimizadas através de um modelo matemático baseado no ângulo definido pelas variações, dadas em metros, nas componentes de latitude e longitude da posição da embarcação de sondagem entre dois instantes consecutivos, variando de 1 a 5 segundos. Desta forma verificou-se uma acurácia 2dRMS de 21,03 cm e 25,68 cm para os sistemas RTK FlexPak e Trimble, respectivamente, e de 64,27 cm para o sistema RTG C-Nav. Nestes três sistemas, a precisão de suas altitudes elipsoidais foi de aproximadamente 13 cm, o que permitia considerar a tendência de suas variações como representativas das oscilações do nível do mar. Contudo o sistema RTG apresentou dois problemas principais advindos da não aplicação das correções de marés terrestres às suas soluções de posicionamento, e da necessidade de um tempo excessivo para inicialização após perdas de sinal, ocasionando descontinuidades (degraus) nos dados coletados.

A acurácia dos sistemas DGPS não deve ser entendida de forma absoluta, uma vez que dependem dos erros correlacionados em função da distância às respectivas estações de referência. O receptor Ashtech Z-XII obteve uma acurácia 2dRMS estimada em 1,069 m (situado a aproximadamente 3 km de sua estação de referência), e o receptor Trimble NT200D, 3,032 m (situado a aproximadamente 34 km de sua estação de referência). Logo, não seria recomendável o emprego do receptor Trimble NT200D em levantamentos hidrográficos de Ordem Especial, sem estudos preliminares de sua acurácia relativa.

Por fim todas as verificações são consubstanciadas através das análises das linhas de verificação, as quais permitem avaliar a qualidade do mesmo levantamento em função de cada tipo de correção de maré aplicada aos dados editados. Associando estas análises às verificações de acurácia de cada sistema de posicionamento, pode-se concluir que:

a) A aplicação da metodologia de reduções batimétricas em sistemas acústicos monofeixe, a partir da variação das altitudes elipsoidais, coletadas durante os levantamentos no mar, é possível desde seja determinada a relação entre o NR e o elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150 em toda a área de trabalho; realizado um rigoroso alinhamento absoluto (cálculo dos *offsets*) e relativo (sincronismo e determinação da latência) entre os sensores empregados; e

determinação precisa da altura da antena GPS e profundidade de imersão do transdutor em relação a um referencial fixo à embarcação de sondagem;

b) A técnica de posicionamento GPS RTK permite a obtenção de profundidades reduzidas condizentes com os padrões exigidos para levantamentos de Primeira Ordem e de Ordem Especial, podendo ser recomendado o seu emprego, observadas as condições descritas no parágrafo (a), em áreas costeiras, rios ou águas interiores, afastadas de estações maregráficas de referência;

c) As técnicas WADGPS de alta precisão, como o sistema RTG C-Nav, apresentam-se como uma alternativa para regiões distantes da costa, e / ou de difícil acesso que inviabilizem a instalação e a operação de estações de referência (maregráficas e RTK). Neste caso, são ainda necessários estudos para sua validação e determinação do comportamento do NR em relação ao elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, através de modelagem numérica e realizações de fundeios na área; e

d) O método de posicionamento DGPS, baseado nas correções diferenciais de pseudodistância a partir do código ou código suavizado pela portadora, pode ser recomendado em levantamentos de Primeira Ordem em áreas próximas às estações de referência, onde haja disponibilidade de observações maregráficas confiáveis.

Os resultados das análises das linhas de verificação permitem validar o modelo estatístico empregado para a estimativa do ETP, assim como o teste estatístico proposto por FERNANDES (2005). Pode-se afirmar que, desta forma, foram atingidos todos os objetivos propostos nesta pesquisa.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Resultam deste trabalho de pesquisa as seguintes recomendações para aplicações e trabalhos futuros empregando a metodologia de reduções batimétricas GPS:

a) Introduzir a informação de altitude elipsoidal de pelo menos uma RN nas fichas F-41 das estações maregráficas a fim de permitir uma idéia da separação vertical entre o nível de redução local e o elipsóide associado ao sistema WGS-84 G1150;

b) Desenvolver estudos para a realização de referencias cartesianos locais em diques secos, através de métodos topográficos, a fim de permitir a materialização e o acompanhamento de possíveis alterações em um referencial fixo (linha d'água

estática) aos navios e lanchas empregados em levantamentos hidrográficos. A partir deste referencial fixo, são determinados os vetores das antenas GPS RTK e transdutores dos ecobatímetros. Um exemplo desta metodologia pode ser encontrado em JUBANSKI (2005, p. 32);

c) Avaliar a qualidade das profundidades reduzidas obtidas a partir das alturas das antenas GPS RTK e profundidade de imersão dos transdutores em relação ao referencial da embarcação, determinados de acordo com estudos apresentados no parágrafo (b). Neste estudo podem estar incluídas as validações do método de GOLDAN para determinação da altura das antenas e o método descrito em 5.3.1 para estimativa dos *offsets* laterais entre sensores;

d) Realizar a modelagem numérica do comportamento do NR em relação ao elipsóide de referência associado ao sistema WGS-84 G1150, através de modelos hidrodinâmicos e fundeios, a fim de estender o estudo para áreas mais distantes das estações maregráficas, permitindo uma comparação com resultados convencionais, através do método de zoneamento discreto (subáreas de redução);

e) Avaliar a possibilidade de aplicação das reduções batimétricas GPS nos sistemas multifeixe, através do desenvolvimento de um modelo estatístico do ETP (Erro Total Propagado) considerando as incertezas envolvidas no processamento das altitudes elipsoidais para geração das correções de marés, e na determinação da relação NR - elipsóide WGS-84 G1150;

f) Aperfeiçoar o programa SIRBAT/GPS. Dentre as melhorias do programa podem-se citar: o desenvolvimento das rotinas de digitalização automática de maregramas e adaptar sua aplicação, através de métodos de otimização, como Filtro de Kalman, para geração de correções de marés em tempo real;

g) Ampliar as análises das acurácias dos sistemas RTK e DGPS, gerando um banco de dados consistente que permita o desenvolvimento de estudos de análise discriminante, a partir dos parâmetros fornecidos pelos sistemas de posicionamento diferenciais (HDOP, VDOP, idade dos dados transmitidos pelas estações de referência, número de satélites, distâncias às estações de referência etc), para o monitoramento em tempo real da qualidade das posições, dentro de um certo nível de confiança; e

h) Atualização das Instruções Técnicas, para normatização da metodologia de reduções batimétricas por GPS nos levantamentos hidrográficos realizados no país.

REFERÊNCIAS

AANDERAA INSTRUMENTS. Data sheet D 196, JUNE 2000. Disponível em <http://www.aanderaa.no/docs/WLR_7_8.pdf> Acesso em 29 maio 2006.

ADAMS, R., TS 40.2 A Vertical Reference Surface for Hydrography - Status Report 2005, FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, 2005, **Proceedings...** 6 p.

ALKAN, R.M.; PALANCIOGLU, H.M. Determination of Mean Sea Level with GPS on Vessel. In: Institute of Navigation GPS 99, Nashville, 1999. **Proceedings...** p. 1323-1330.

ANDRADE, J.B.; GEMAEL, C. **Geodésia Celeste**. Curitiba: Editora UFPR, 2004, 389 p.

ARROYO-SUAREZ, E.N.; RILEY, J.L.; MABEY, D.L. Evaluating a Global Differential GPS System for Hydrographic Surveying. In: Institute of Navigation GNSS 2005, Long Beach, 2005. **Proceedings...**

ARTILHEIRO, F. Depth Determination. In: INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Manual on Hydrography**. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005. 501p. p.119-198.

ASHKENAZI, V., G. A. BASKER AND T. F. BAKER. Monitoring Mean Sea Level with GPS. The Hydrographic Society SP.26, HYDRO 90, **Proceedings of 7th Biennial Symposium of the Hydrographic Society**, Southampton, 1990.

BALAY, M.A., La cote du plan, **Revue Hydrographic Internationale**. v. XXIV, n. 2, p. 109, 1952.

BISNATH, S.; WELLS, D.; DODD, D. Evaluation of commercial carrier phased-based WADGPS services for marine applications. In: Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, Portland, 2003. **Proceedings...**

BRASIL, Decreto-Lei n. 243, de 28 de fevereiro de 1967. Fixa as Diretrizes e Bases da Cartografia Brasileira e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, DF, p. 2438, 28 fev. 1967. Seção 1, col. 2.

BRIONES, A.B., **Análise do posicionamento DGPS baseado nas ERDGPS implantadas no litoral brasileiro**, 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

BROWN, N.; KEENAN, R.; RICHTER, B.; TROYER, L. Advances in ambiguity resolution for RTK applications using the new RTCM 3.0 Master-Auxiliary messages. In: Institute of Navigation GNSS 2005, Long Beach, 2005. **Proceedings...**

C&C TECHNOLOGIES INC., **C-Nav 2050 GPS Product User Guide**, Lafayette: GPS Services Group, 2005

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). BANCO NACIONAL DE DADOS OCEANOGRÁFICOS (BNDO): **Análise Harmônica e Estatística da Maré (Estação 50141 - Ponta da Armação)**, 4 mai. 2006.

_____. **Catálogo de Fichas F-21**. Niterói, 2000.

CISTERNELLI, M., GILL, S. Implementation of TCARI in NOS Hydrographic Survey Operations, U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, 2005, San Diego. **Proceedings...**

CLARKE, J.E.H. A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning? U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2003, 2003, Mississippi. **Proceedings...**

CLARKE, J.E.H., DARE, P., BEAUDOIN, J., BARTLETT, J. A stable vertical reference for bathymetric surveying and tidal analysis in the high Arctic. U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, 2005, San Diego. **Proceedings...**

COURTIER, A. **Marées**, Service Hydrographique de la Marine, Paris, 1938.

COLLINS, J.P.; LANGLEY, R.B. Nominal and Extreme Error Performance of the UNB3 Tropospheric Delay Model. **Final contract report for Nav Canada Satellite Navigation Program Office**. Geodetic Research Laboratory, Departments of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report n. 34, University of New Brunswick, Fredericton, 1999, 173 p.

COLLINS, C.M. **The Study of Total Propagated Error in Hydrographic Surveying**. Report of Bachelor of Science in Engineering. Departments of Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick, Fredericton, 2004, 106 p.

DALAZOANA, R. **Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro**, 202f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DE LOACH, S. R. GPS Tides and Datums. **The Hydrographic Journal** no.75, Janeiro, pp. 3-7, 1995.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN), **INSTRUÇÃO TÉCNICA H-01 – Critérios para correções a serem efetuadas nas sondagens para representação nas FB**. Rio de Janeiro: Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, 1998a

_____. **Histórico, Atividades e Perspectivas**. Rio de Janeiro: Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, 2003, 59p.

EL-MOWAFY, A. Performance analysis of the RTK technique in an urban environment. **The Australian Surveyor**, v. 45, nº 1, pp. 47-54, Sydney, 2000.

FERNANDES, R. A. **Teoria dos Erros**, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, Rio de Janeiro, 2005.

FONSECA, M.M. **Arte Naval Volume I**, 6. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002, 518p.

FRANCO, A.S., **Marés, Fundamentos, Análise e Previsão**, 1.ed, Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1997, 265 p.

FREITAS, S.R.C. **Marés gravimétricas: implicações para a placa sul-americana**, 264f. Tese (Doutorado em Geofísica) - Departamento de Geofísica, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

FREIBERGER JUNIOR, J.; MAYER, M.; SEITZ, K.; HECK, B.; KRUEGER, C. Calibração de antenas GPS em diferentes estações. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 157-177, 2005.

GARNÉS, S.J.A., **Resolução das Ambigüidades GPS para Linhas de Base Curta: Análise dos Algoritmos de Otimização**, 204f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

GOLDAN, H.-J., Tide Observations with Kinematic GPS on Ships. In: International Symposium on Marine Positioning INSMAP 94, 1994, Hannover. **Proceedings INSMAP 94**. Rockville: PIP PRINTING, 1994. 595 p. p.585-595.

HARE, R. **Error Budget Analysis for US Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO) Hydrographic Survey Systems**. University of Southern Mississippi, 2001. 155p. Final Report.

HEIN, G.W., LANDAU, H., BLOMENHOFER, H., Determination of Instantaneous Sea Surface, Wave Heights, and Ocean Currents Using Satellite Observations of the Global Positioning System, **Marine Geodesy**, v. 14, pp. 217-224, 1990.

HESS, K., Water level simulation in bays by spatial interpolation of tidal constituents, residual water levels and datums, **Continental Shelf Research** n.23, 2003, p. 395-410

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. 5.ed. Wien: Springer-Verlag, 2001, 382 p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LEGAT, K.; WIESER, M. **Navigation principles of positioning and guidance**. Wien: Springer-Verlag, 2003, 427 p.

HUDSON, J.R.; SHARP, T. Globally Corrected GPS (GcGPS): C-Nav GPS System. Dynamic Positioning Conference, Marine Technology Society, Houston, 2001. **Proceedings...**

HYPACK INC., **HYPACK MAX User's Manual**, Middletown: HYPACK Inc, 2005

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados Geodésicos**. Disponível em:

<<http://mapas.ibge.gov.br/website/geodesia2/viewer.htm>>. Acesso em 17 maio 2006.

ICD-GPS-705 rev 2. INTERFACE CONTROL DOCUMENT ICD-GPS-705 **Navstar GPS Space Segment / User Segment L5 Interfaces**. ARINC Inc., El Segundo, 2002, 81 p.

ICD-GPS-200 rev C. INTERFACE CONTROL DOCUMENT. ICD-GPS-200. **Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces**, ARINC Inc., El Segundo, 2003, 198 p.

IS-GPS-200 rev D. INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200. **Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces**, ARINC Inc., El Segundo, 2004, 207 p.

INGHAM, A.E. **Hydrography for the Surveyor and Engineer**. London: Granada, 1984, 132 p.

International Hydrographic Organization (IHO). **IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication n. 44**. 4.ed. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 1998, 26 p.

_____. **Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO**. 3.ed. Principado de Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005, 360 p.

Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation Volume I – Basic Procedures**. IOC Manuals and Guides no. 14, UNESCO, 1985. 75 p.

_____. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000**. IOC Manuals and Guides no. 14, UNESCO, 2002. 55 p.

JUBANSKI, J.J. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de vôo apoiado por GPS para aerotriangulação por feixes de raios**, 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KENNEY, J.F., KEEPING, E.S., **Mathematics of Statistics - Part One**. 3.ed. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1961, p. 348

KIELLAND, P.; HAGGLUND, J. The Use of DGPS to Measure the Heave Motion of Hydrographic Survey Vessels. **International Hydrographic Review**, Monaco, LXXII(1) pp. 83-99, 1995.

KOUBA, J. ITRF Transformations. **GPS Solutions**, nº 5, pp. 88-90, 2001

KRUEGER, C.P. Integração do GPS e da Ecobatimetria, **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.5, p.55-68, 1999.

_____, **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho**, 267f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

KUMAR, M e MAUL, G. A. GPS Surveyed time-invariant sea floor depths for safe navigation, **GPS World (digital edition)**, set, 2005

LACHAPELLE, G.; DE JONG, C.D.; SKONE, S.; ELEMA, I.A. **Hydrography**. Delft: VSSD, 2006, 354 p.

LANGLEY, R.B. RTK GPS. **GPS World**, Oregon, v.9, n.9, p.70-76, 1998.

LAMBERTI, L.; DI LIETO, A.; LAWRENCE, R.N., P. Positioning. In: INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Manual on Hydrography**. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2005. 501p. p.33-118

LAPUCHA, D.R.; BARKER, L.; OTT, T.E.; MELGARD, O.; ØRPEN, ZAMM, H., Decimeter-level real-time carrier phase positioning using satellite link. **Proceedings of Institute of Navigation 2001 International Technical Meeting**, 11-14 September, Salt Lake City, Utah, USA, pp.1624-1630.

LAU, L.; CROSS, P. Impact of GPS Modernization on Precise Carrier Phase-Based Positioning in the Presence of Multipath. ION GPS/GNSS 2003, Portland, 2003, **Proceedings...** p. 2163-3172.

LEICA GEOSYSTEMS. **GPS1200 Technical Reference Manual version 2.0**, 2005, 1296 p.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 435 p.

LENZ, E. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) - Application and Benefit in Modern Survey Systems, FIG Working Week, Atenas, 2004. **Proceedings...**

LUTZ, P.; GOUNON, R. THALES Navigation's LRK, an improved RTK solution for long baselines: technique, applications and field results. In: Institute of Navigation GPS 2001, **Proceedings...**, ION GPS 2001, Salt Lake City, 2001, p. 1027-1038

MARTIN, R.J.; BROADBENT, G.J., Chart Datum for Hydrography, **The Hydrographic Journal**, n. 112, Abril, 2004, pp. 9-14.

MIGUENS, A.P. **Navegação: A CIÊNCIA E A ARTE - VOLUME III - NAVEGAÇÃO ELETRÔNICA E EM CONDIÇÕES ESPECIAIS**. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996, 1822p.

MIGUEZ, B.M.; GÓMEZ, B.P.; FANJUL, E.A. The ESEAS-RI Sea Level Test Station: Reliability and Accuracy of Different Tide Gauges. **International Hydrographic Review**, v.6, n. 1, p. 44-53, 2005.

MILLS,J.,GILL,S., Water Levels and Flow. In: INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Manual on Hydrography**. Monaco: International Hydrographic Bureau,2005. 501p. p.253-300.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). **Sistema de Análise das Informações do Comércio Exterior via Internet (ALICEWEB)**. Disponível em <<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/default.asp>> Acesso em 25 janeiro 2007.

MONICO, J.F.G., **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**, Presidente Prudente: Editora UNESP, 2000, 287 p.

MONTEIRO,L.S.; MARREIROS,P.R. Analysis of Maritime DGPS positoning accuracy at sea. Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, Portland, 2003. **Proceedings...** p. 38-44.

NASH ,J.C. **Compact numerical methods for computers**. Bristol: Adam Hilger, 1990, 278 p.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Computational Techniques for Tidal Datums Handbook. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 2**. Silver Spring: NOAA, 2003, 113p.

NATIONAL MARINE ELETRONICS ASSOCIATION (NMEA). **NMEA 0183 Standard**. Disponível em <<http://www.nmea.org/pub/0183/index.html>> Acesso em 14 de janeiro de 2007.

NORDEN,M.F.,ARROYO-SUAREZ,E.N.,NAJJAR,A.S. Hydrographic Surveys to IHO Standards without shore station using Real-Time Gipsy (RTG) Global Positioning System, U.S. Hydrographic Conference, US HYDRO 2005, San Diego, 2005. **Proceedings...**

NOVATEL. **OEM4 Family Installation and Operation User Manual Volume 1**, 2004.

ODOM HYDROGRAPHIC SYSTEMS. **INSTALLATION / OPERATION MANUAL Version: 2.22**. Louisiana, 2005.

PRADO, A., **Análise da Acurácia e da Correlação Espacial nas Técnicas DGPS e RTK**, 142f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

PUGH,D. **Changing Sea Levels. Effects of Tides, Weather and Climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 265 p.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR MARITME SERVICES (RTCM), **RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service version 2.2**, Alexandria, 1998

_____, **RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service version 2.3**, Alexandria, 2001

_____, **RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service version 3.0**, Alexandria, 2004

_____, **Overview**, Disponível em: < <http://www.rtcn.org/overview.php>>
Acesso em 23 maio 2006.

RAYMOND, J.M., BROADBENT, G.J. Chart Datum for Hydrography. **The Hydrographic Journal**, n.112, 2004

REMONDI, B.W. Performing centimeter-level surveys in seconds with GPS carrier phase: initial results. **Journal of The Institute of Navigation**, v.32, nº 4, pp. 386-400, 1985.

REMONDI, B.W., FRODGE, S.L., SHANNON, LAPUCHA, D., BARKER, R., Results of Real-Time Testing of GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution On-The-Fly, **ION GPS 92 Proceedings** of Sixth International Technical Meeting of The Satellite Division of Institute of Navigation, Albuquerque, 1992, p. 1053-1061.

REMONDI, B.W., HUFF, L.C., GPS Expedition to Tangier Island. In: Institute of Navigation National Technical Meeting 2000, Anaheim, 2000. **Proceedings...** p. 323-332

RICHARDUS, P.; ADLER, R.K. **Map projections: for geodesists, cartographers and geographers**. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1972

RICHERT, T.; EL-SHEIMY, N. Low-Noise Linear Combinations of Triple-Frequency Carrier Phase Measurements. **Journal of The Institute of Navigation**, vol. 53, nº 1, Spring 2006, 2006

SCARFE, B., Measuring Water Level Corrections (WLC) using RTK GPS, **The Hydrographic Journal**, nº 104, Abril 2002.

SEEBER, G., **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SHANNON, B.F.; WOODWARD, F.M. GPS Tides. Saint Mary's Entrance Channel to Kings Bay. In: International Symposium on Marine Positioning 1998, Melbourne, 1998. **Proceedings ...**

SPG. Soluções em Posicionamento Global. **Informações sobre os rádio-faróis da Marinha**. Disponível em: <<http://www.spg.com.br>>. Acessado em 22/01/06.

SWANSON, R. L., **Variability of Tidal Datums and Accuracy in Determining Datums from short Series of Observations**, NOAA Technical Report NOS 64, Miami, 1974, p. 41.

TSS UK Ltd. **Model 335B Motion Sensor - Operating and Maintenance Manual**. Oxfordshire, 1994, 113 p.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **Background papers and supporting data on the International Equation of State of Seawater 1980**, UNESCO Technical papers in marine science No. 38, 1981.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE), **EM 1110-2-1003 Engineering and Design Hydrographic Surveying. Change 1**. Department of the Army, Washington, 2004.

YEN, P.; JAN, C.; LEE, Y.; LEE, H. Application of Kalman Filter to short-term tide level prediction. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, setembro/outubro, p. 226-231, 1996.

WELLS, D. **An Introduction to CUBE**. In: Trabalho apresentado no I Seminario Internacional SHOA (Servicio Hidrografico Y Oceografico de la Armada). Valparaíso, 2005.

WERT, T.D. **Tidal height retrieval using globally corrected GPS in the Amudsen gulf region of the Canadian Arctic**. 139 f. Thesis (Master of Science in Engineering) The University of New Brunswick, New Brunswick, 2004.

WONG, C., RILEY, J.L., MARTIN, D., HUFF, L.C., HALL, L., GILL, S., FOOTE, R., CARLSON, E. **NOS RTK Team Final Report**, Office of Coast Survey, Center for Operational Oceanographic Products and Services, Office of National Geodetic Survey, p.27, 2000.

APÊNDICE 1 - HISTOGRAMAS DAS ANÁLISES DE LINHAS VERIFICAÇÃO

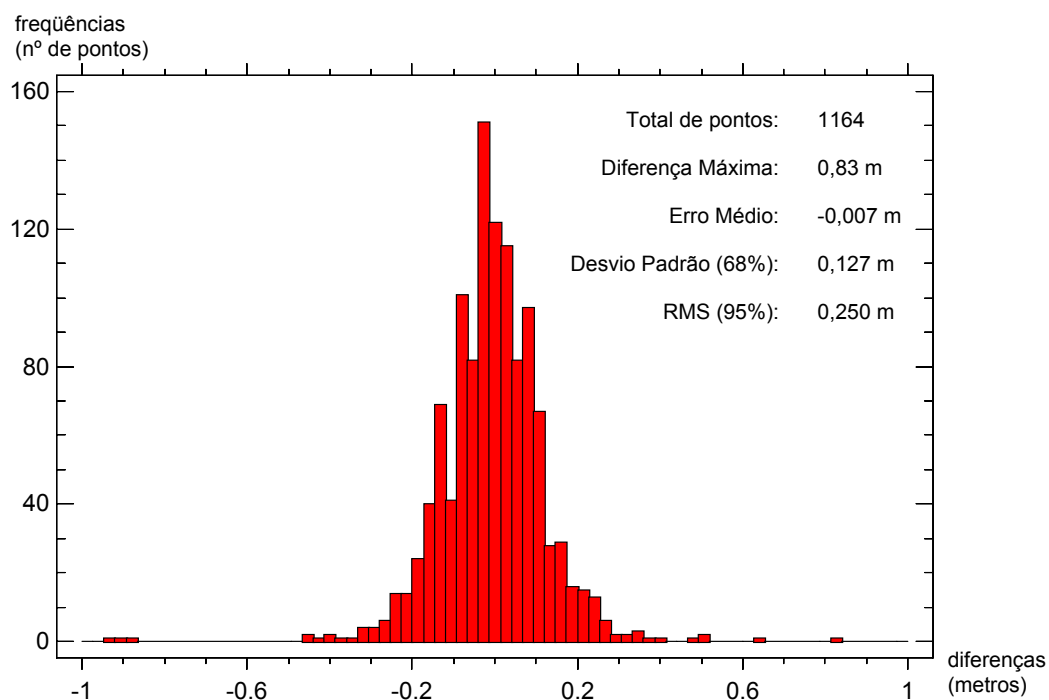


GRÁFICO 1 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK TRIMBLE EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

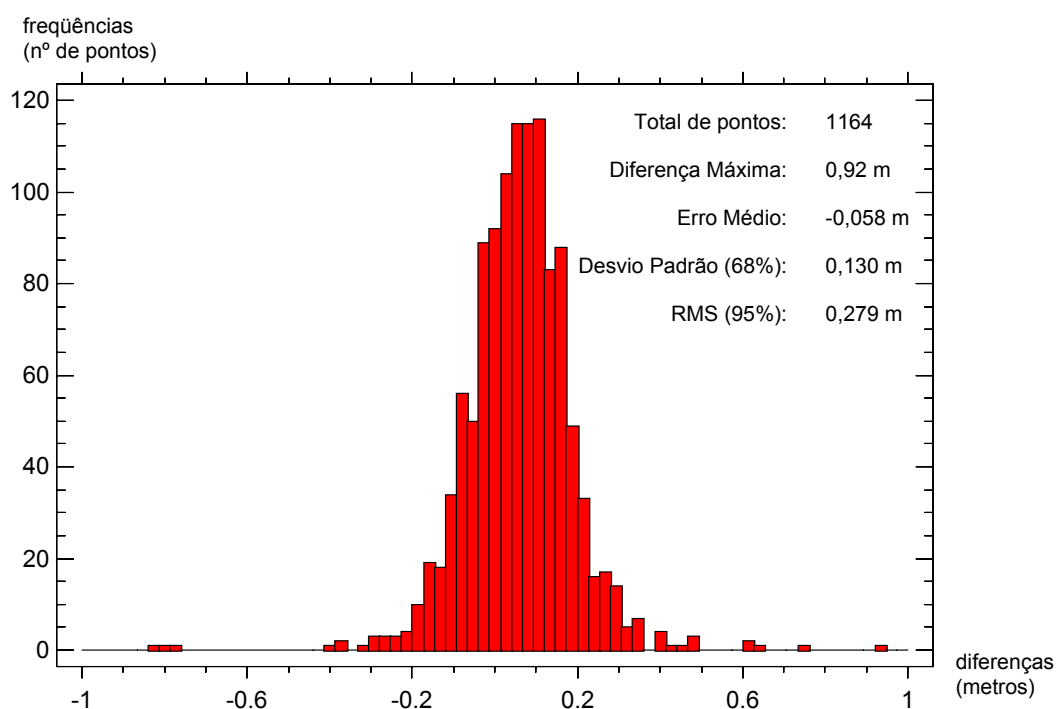


GRÁFICO 2 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK TRIMBLE EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL - DIA 28/07/06

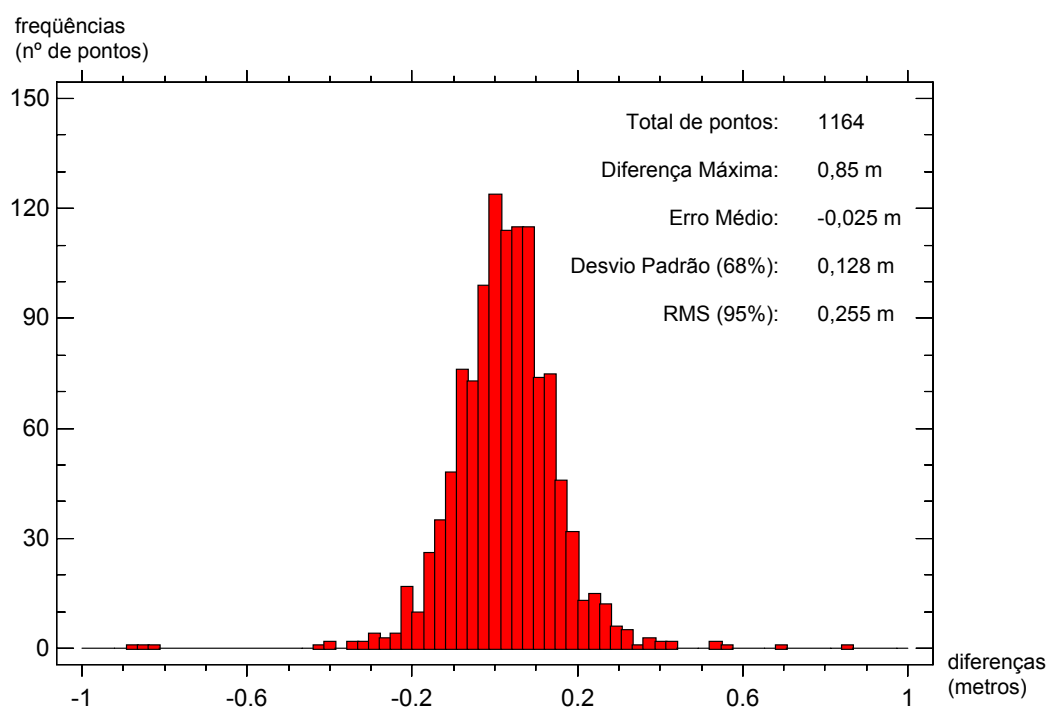


GRÁFICO 3 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK TRIMBLE EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS FILTRADAS POR MÉDIA MÓVEL DE 5 MIN E AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL - DIA 28/07/06

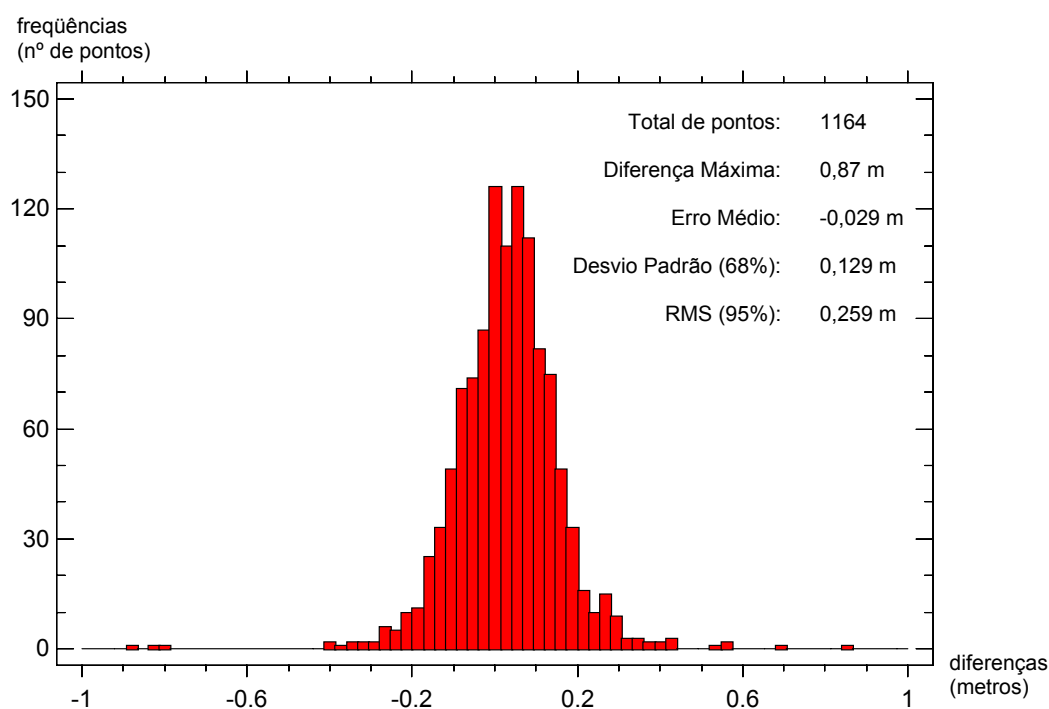


GRÁFICO 4 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK TRIMBLE EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ - DIA 28/07/06

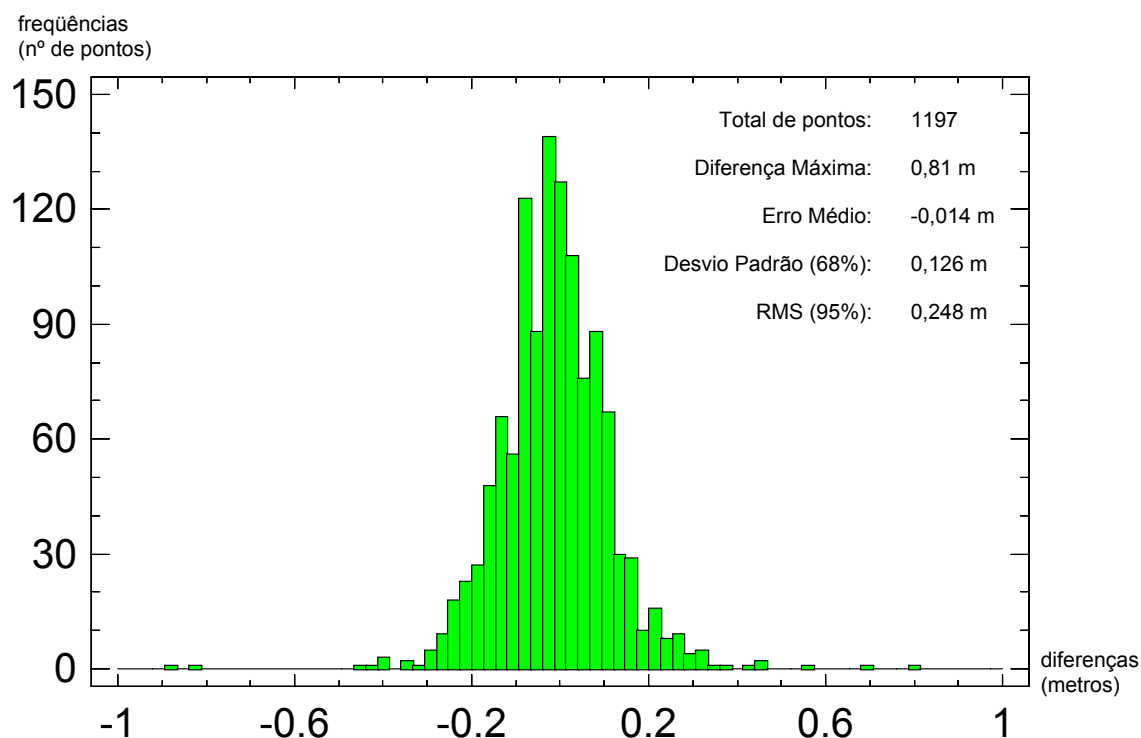


GRÁFICO 5 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTG C-NAV EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

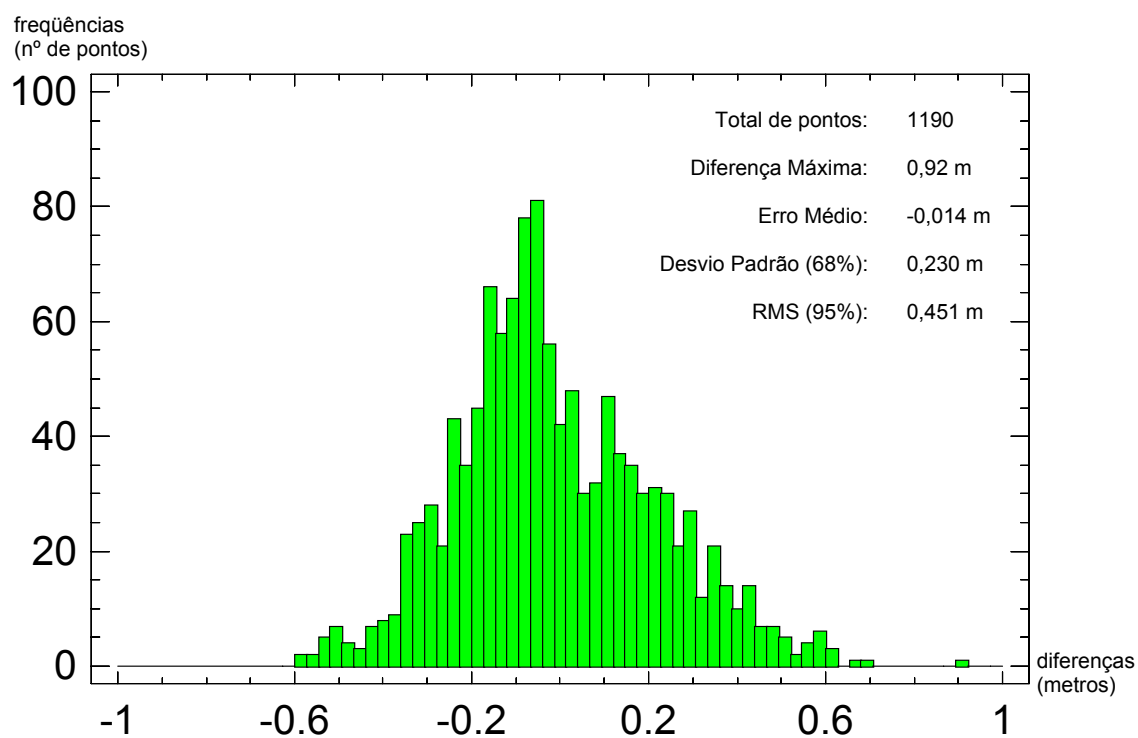


GRÁFICO 6 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTG C-NAV EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

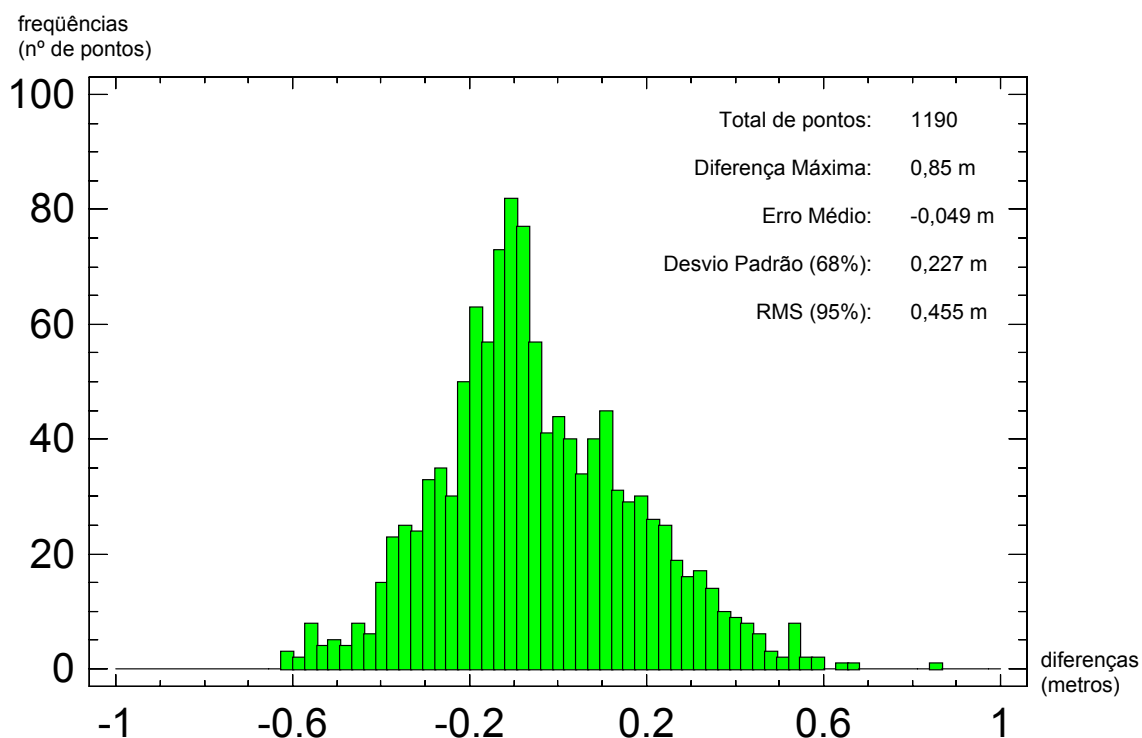


GRÁFICO 7 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTG C-NAV EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS FILTRADAS POR MÉDIA MÓVEL DE 5 MIN. E AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

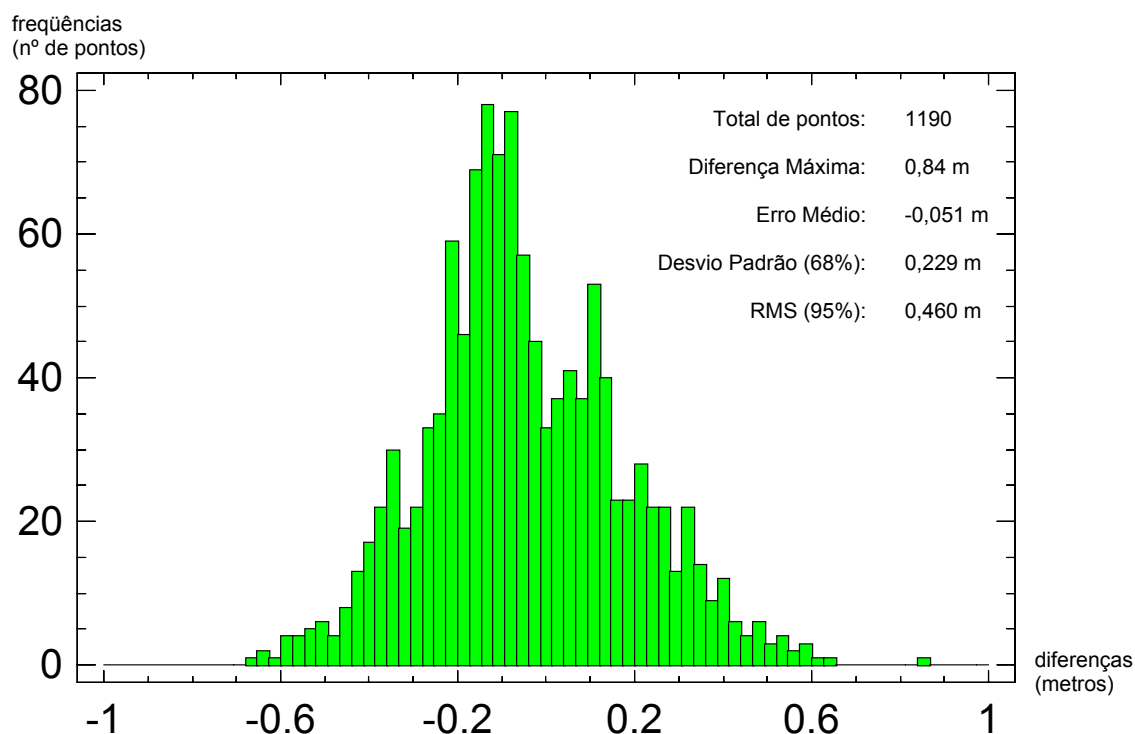


GRÁFICO 8 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTG C-NAV EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

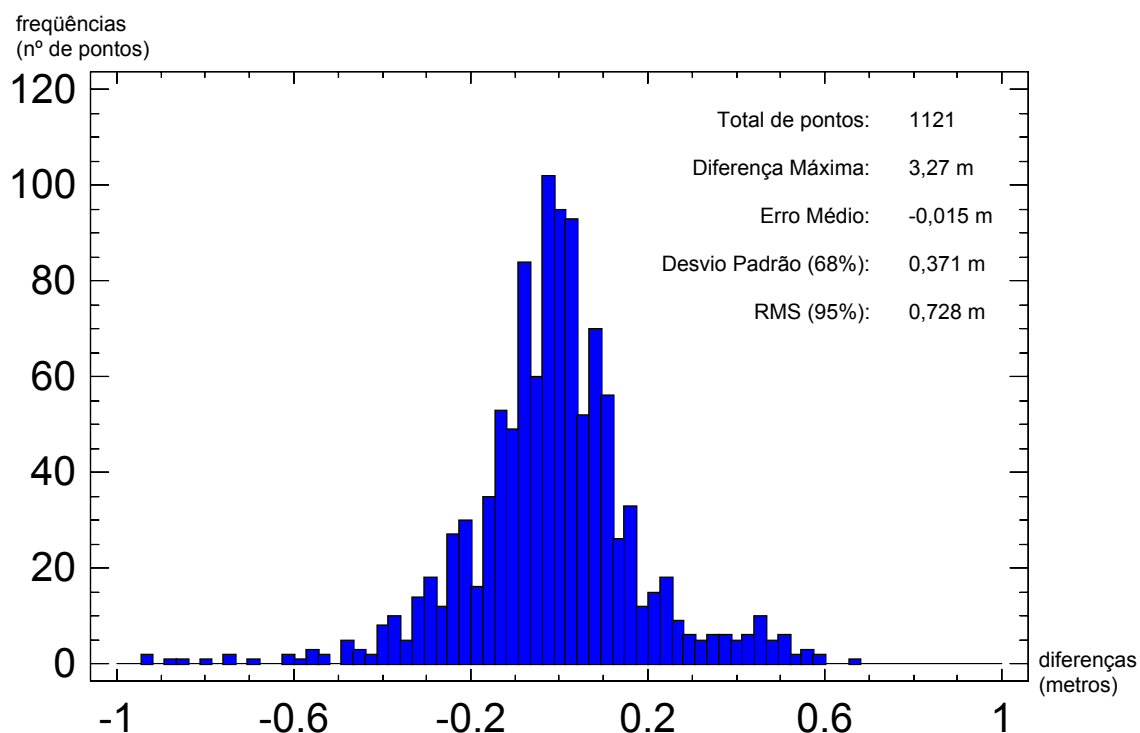


GRÁFICO 9 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK FLEXPAK EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS CONVENCIONAIS (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

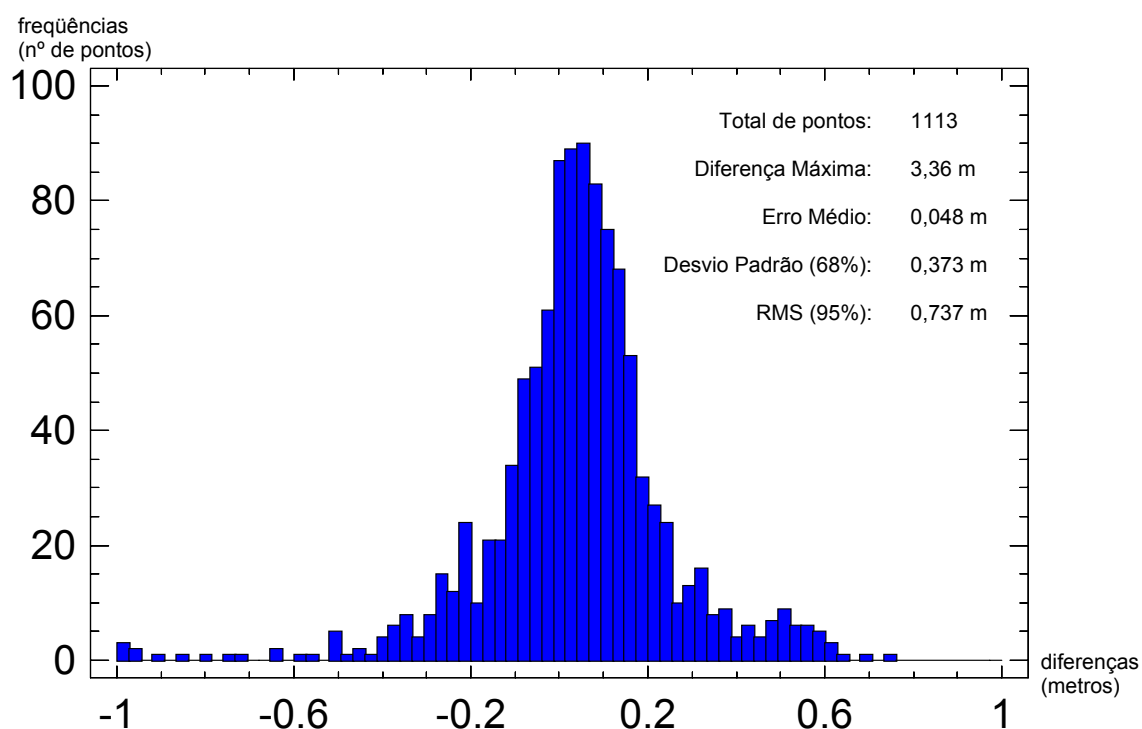


GRÁFICO 10 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK FLEXPAK EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

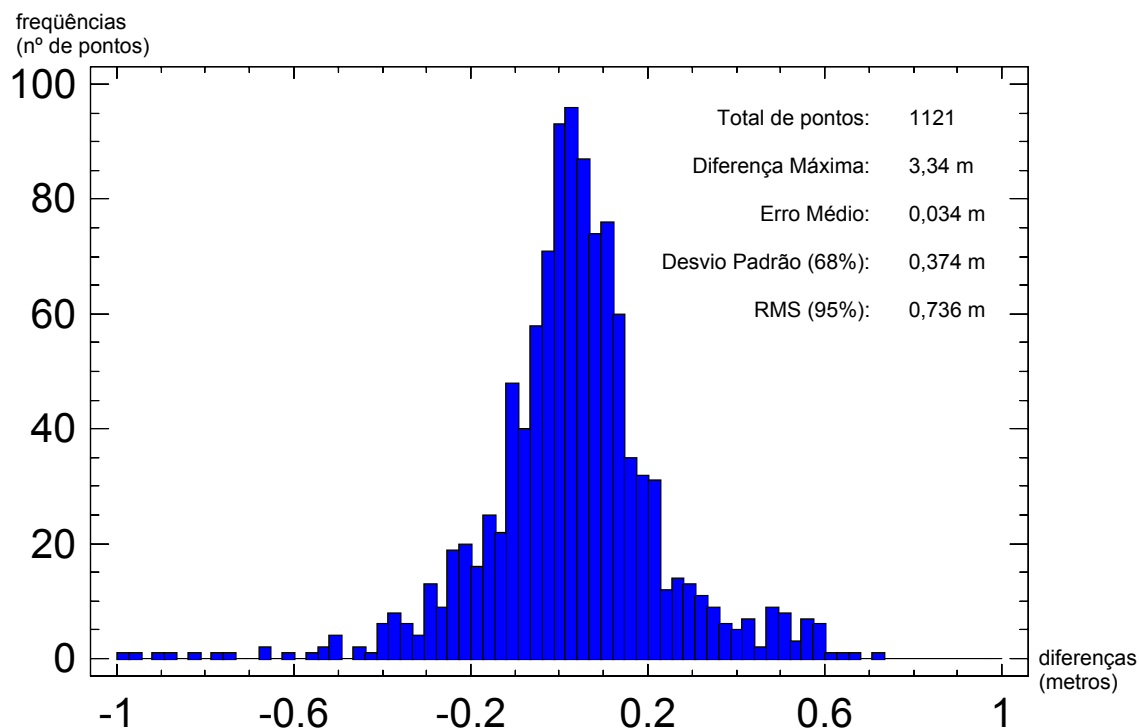


GRÁFICO 11 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK FLEXPak EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS FILTRADAS POR MÉDIA MÓVEL DE 5 MIN AJUSTADAS POR APROXIMAÇÃO POLINOMIAL (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

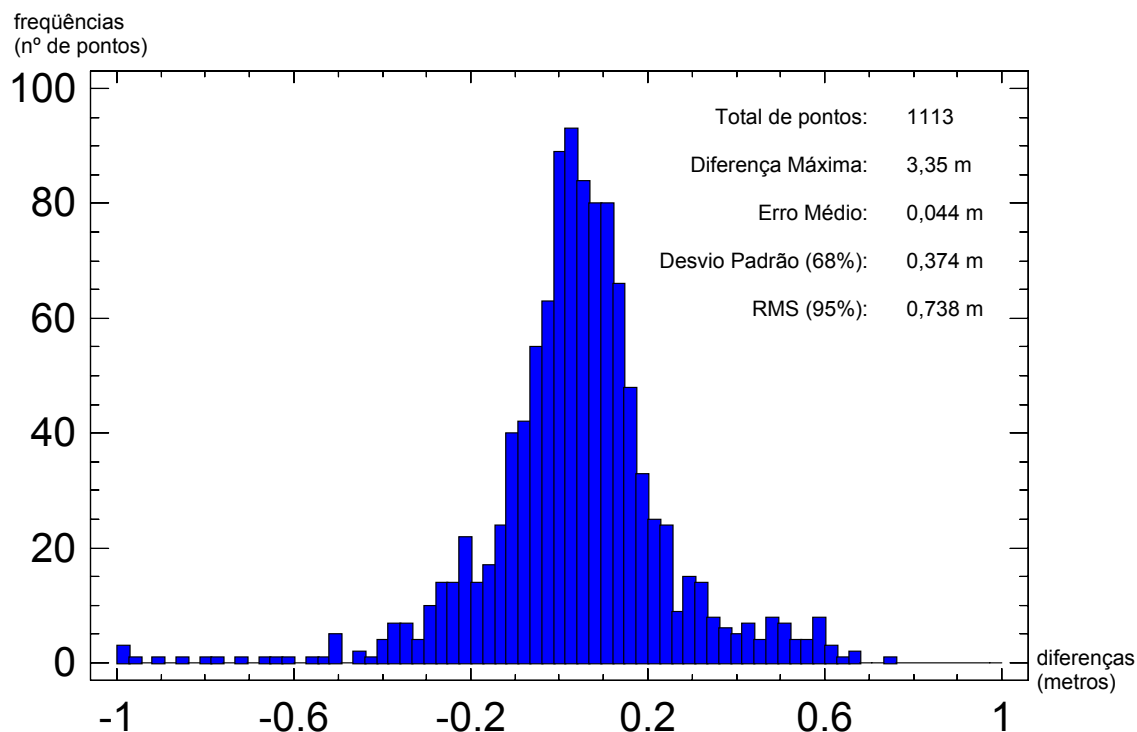


GRÁFICO 12 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK FLEXPak EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ (ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA DA ARMAÇÃO) - DIA 28/07/06

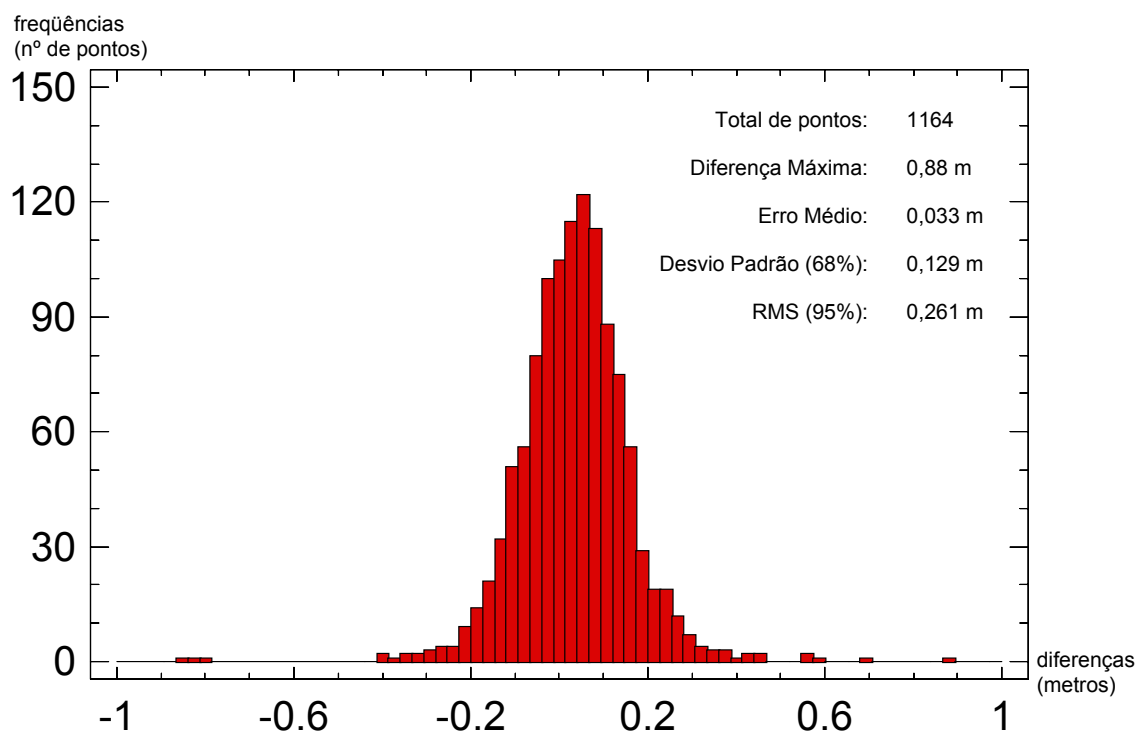


GRÁFICO 13 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS DA ANÁLISE DE LINHAS DE VERIFICAÇÃO PARA O SISTEMA RTK TRIMBLE EMPREGANDO CORREÇÕES DE MARÉS GPS AJUSTADAS POR MMQ CONSIDERANDO LINEAR A VARIAÇÃO DO NÍVEL DE REDUÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DA PONTA DA ARMAÇÃO E DA ILHA FISCAL - DIA 28/07/06

**ANEXO 1 - FICHA F-41-1515-001/05 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA ILHA
FISCAL (50140)**



50 140

F-41

DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA

F – 41 – Padrão - Ilha Fiscal – 50140 - Versão 1/2005

F- 41 - 1515 - 001 / 05

Estação Ilha Fiscal

Estado RJ

Localidade Ilha Fiscal

LH

Carta N°. 1515 – Baía de Guanabara - Ilha do Mocanguê e Proximidades

Navio CHM-31

Ano 2005

Coordenadas geográficas

Lat 22° 53'.8 S

Long 043° 10'.0 W

Datum

Fuso + 3

O nível de redução está 152,5 centímetros acima do zero da régua de 2003/2005.

Fonte de informação: Análise estatística e harmônica de 731 dias de observação da maré.

Tipo de marégrafo: Hidrologia Diário Esc. 1:20

Zero do marégrafo: Coincide com o zero da régua.

Descrição das réguas de marés

Composta de 5 réguas de alumínio HIDROMEC, com seções de 1 metro e comprimento total de 5 metros, fixada ao lado do acesso ao abrigo do marégrafo.

Esta ficha foi compilada das F-41-1512-001/99 e F-41-1512-001/01- Versão 1/2005. Atualizada em 22/12/2005.

Descrição das referências de nível

RN-1: Marco de metal encastrado na parede interna do torreão, acima da RN-2;**RN-2:** Marco de metal, encastrado no chão, abaixo da RN-1;**RN-3:** Padrão DHN, situada no batente da calçada do prédio principal, aproximadamente, 20m a oeste da estação maregráfica. IMPLANTADA em 2003, segundo o SO (RRf) Cardoso;**RN-IBGE:** Marco de metal circular, com a inscrição 2953H, ao lado esquerdo da escada de acesso à faxinaria e aproximadamente, a 16m da estação maregráfica;**RN-IBGE:** Marco de metal circular, com a inscrição 93517 SAT, do lado esquerdo do pilar de observação magnetométrica a aproximadamente 1 m deste;**RN-PILAR:** Marco de metal, encastrado no topo de um pilar de observação magnetométrica, situado à esquerda da entrada, a cerca de 3,0m da estação maregráfica.

Pessoal que tomou parte na montagem

Equipe de 22/02/2001
CMG (RRm) Machado, Prof. Geraldo
SO HN Cunha, SO HN (Ref.) Cardoso
CB HN Ernani

Chefe da equipe: 1T Maria Fernanda

Equipe de 03/05/2005
Engenheiro Sandro Paixão
Geógrafo Denes (IEAP)
SG-HN Ribeiro, SG-HN Jesus

Chefe da equipe: SO-HN (Ref.) Cardoso

DHN-6016-A

Arquivo Técnico (a ser preenchido no CHM)

Recebida em

Documento de referência

**ANEXO 2 - FICHA F-41-1515-001/85 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA PONTA
DA ARMAÇÃO (50141)**



50141

F - 41

DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA

F-41-Padrão-Ponta da Armação-50141-Versão 1/2005

F- 41 – 1515 – 001 / 85

Estação Ponta da Armação

Estado RJ

Localidade Niterói

LH Carta N°. 1515 – Baía de Guanabara – Ilha do Mocanguê e

Navio DHN - 31 Ano 1985

Coordenadas geográficas

Lat 22° 53'.0 S
Long 043° 08'.1 W
Datum

Fuso + 3

O nível de redução está 114.0 centímetros acima do zero da régua de 1984/1986.

Fonte de informação: Análise estatística e harmônica de 668 dias de observação de maré.

Tipo de marégrafo: Hidrologia Diário Esc: 1:20

Zero do marégrafo: coincide com o zero da régua.

Descrição da régua de marés

Régua de madeira com 3,80m, fixada ao cais, junto ao abrigo do marégrafo.

Os parafusos de fixação da régua estão na altura de 3,60m e 2,50m.

Esta ficha foi compilada das F-41-1512-01/85, F-41-1501-001/88 e atualizada em 10/11/2005.

Descrição das referências de nível

RN-1 – RN padrão DHN, encravada no degrau superior da escada ao lado do marégrafo. IMPLANTADA em 04/08/1983;

RN-2 – RN padrão DHN, encravada na soleira da porta principal do prédio da antiga Praça D'Armas. IMPLANTADA em 04/08/1983;

RN-3 – RN padrão DHN, encravada na base do monumento (Face "N") aos mortos do "CAM". IMPLANTADA em 04/08/1983;

RN-4 – RN padrão DHN, encravada no canto da parede, junto ao paiol de material da lancha "Prócion" (próximo cais "S"). IMPLANTADA em 04/08/1983;

RN-2994 L– Marco testemunho padrão IBGE, encravado no lado oposto dos degraus da escada da RN-1, abaixo do nível do chão e protegido por uma tampa. IMPLANTADA em 1995.

DHN-6016-A

Arquivo Técnico a ser preenchida no CHM

Recebida em
Documento de referência

Pessoal que tomou parte na montagem

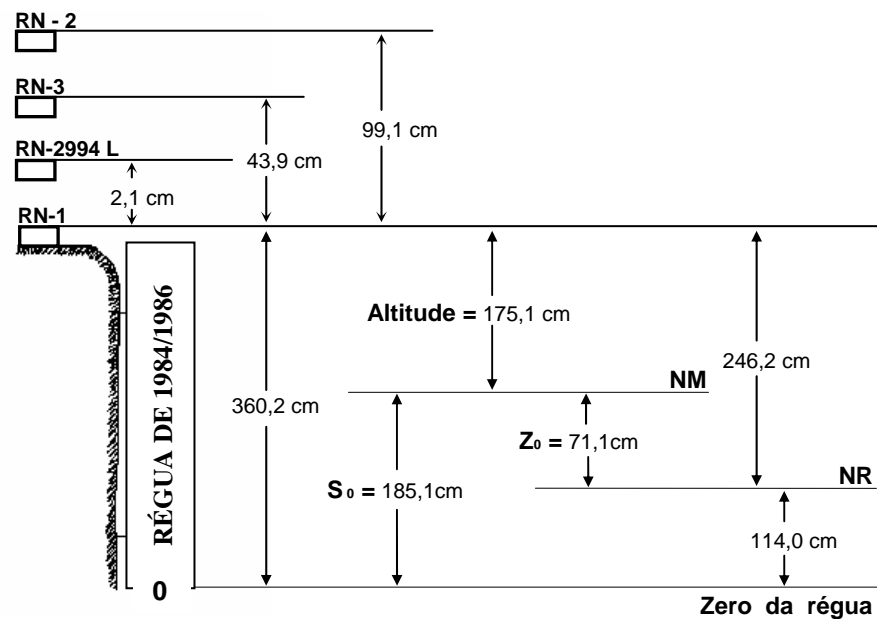
Equipe de agosto de 27/06/1985

FC Marco Antônio
FC Soriano.
CB-HN Dimas
Chefe da equipe: SG Orion

Equipe de agosto de 1988

SG Fontenele
FC Marco Antônio
FC Soriano
Chefe da equipe: SG Orion

Diagrama



Observações

1. Período de observação para obtenção dos elementos de maré: 01/09/1984 a 30/06/1986;
2. A análise foi efetuada usando o método harmônico, sendo os dados processados pelo BNDO;
3. A RN-4 não está amarrada as RRNN da estação.

Esquema

